

长江上游森林影响流域水文过程模拟分析

郑绍伟¹, 慕长龙^{1,*}, 陈祖铭², 龚固堂¹, 黎燕琼¹

(1. 四川省林业科学研究院, 成都 610081; 2. 四川大学水利水电学院, 成都 610085)

摘要: 用森林流域水文模型(FCHM)模拟分析长江上游森林植被变化下的平通河流域和刘家河流域森林水文过程。可知随着两个流域森林覆盖率(FR)的提高, 林冠截留量的增加和土壤入渗能力的改善, 使得径流成分比例也随之发生变化, 地表径流 R_s 逐渐减少, 快速流转换为慢速流, 因此延迟了流域降水汇流时间, 洪峰流量得以削减。以平通河为例, 当该流域全部被森林覆盖以后, 则流域百年一遇的设计洪水标准可由非森林地时的 $4520\text{m}^3/\text{s}$ 降到 $3380\text{m}^3/\text{s}$, 因此森林的存在可大大提高流域的防洪能力; 而两个流域又由于区域结构等条件的不同, 使得流域径流成分所占比例不同。其中平通河流域径流成分主要以浅层径流 R_s 和深层径流 R_p 为主, 而刘家河流域径流成分主要以壤中流 R_i 为主, 且都随森林覆盖的增加而有所增加。不同的径流成分为流域蒸散发带来了不同的水分条件, 因此流域蒸散发量随着森林覆盖率的增加各有不同的变化趋势。其中平通河流域随着森林覆盖率的增加, 流域蒸散发总量将由非森林地时候的 373.3mm 减少至 289.3mm , 根据水量平衡原理, 该流域径流总量则会增加, 呈流域径流正效应(23.7%); 而后者流域则相反, 随着森林覆盖率的增加, 流域蒸散发总量反而会逐步增加, 则流域径流总量会随之减少, 呈流域径流负效应(-8.6%)。

关键词: 森林流域; 水文模型; 水文过程; 径流; 洪水

Simulations and analysis on the effects of forest on the hydrological processes in the upper reaches of Yangtze River

ZHENG Shaowei¹, MU Changlong^{1,*}, CHEN Zuming², GONG Gutang¹, LI Yanqiong¹

1 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

2 College of Hydraulic&Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610085, China

Abstract: By applying of forest watershed hydrological model (FCHM), this paper simulated the forest hydrological effects in Pingtong and Liujia watersheds of the upper reaches of Yangtze River. With the increase of forest cover (FR), the canopy interception and soil infiltration capacity were improved; as a result, the surface runoff(R_s) decreased and rapid flow converted into slow flow, and the time period needed for runoff accumulation delayed, so that the flood peak was alleviated. For example, with forest cover, the flooding control criteria for Pingtong watershed decreases to $3380\text{m}^3/\text{s}$ from $4520\text{m}^3/\text{s}$ (without forest cover). indicating the existence of forest can enhance the flooding control capacity of the watershed. The different characteristics of the two watersheds, the major runoff components in Pingtong watershed are shallow runoff (R_s) and deep runoff (R_p), but are dominated by interflow (R_i) in Liujia watershed. All of these components increase with the increasing FR . The different runoff components brought different moisture conditions, as the result, the evapo-transpiration show different trends with the increase of FR . In Pingtong watershed, with the increase of FR , the evapo-transpiration decreased from 373.3mm to 289.3mm but runoff went up, resulting in a positive effect of 23.7% . In Liujia watershed, higher FR resulted in the increase of the evapo-transpiration and the decrease of runoff, resulting in a negative effect of -8.6% .

Key Words: forest watershed; hydrological model; hydrological processes; runoff; flood

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0204)

收稿日期: 2009-08-14; 修订日期: 2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mucl2006@yahoo.com.cn

森林与水之间的关系是极其复杂的,森林水文效应则是生态系统中森林和水相互作用及其功能的综合体现。在任何条件下都应肯定:森林是一种结构复杂、功能多样的生态系统,它符合系统论的基本原理,即:系统功能决定于系统结构;合理的、优化的结构,可以产生良好的效应(正效应);不合理的结构则会降低功能,甚至产生负效应^[1]。目前,国内外在森林水文学研究中,通常采用小流域原型对比试验法、水文事件模型分析法、大中时空尺度水文特征量统计分析法等研究森林水文效应^[2-5]。森林水文效应研究的焦点主要集中在:(1)森林的存在是增加流域径流量还是减少流域径流量;(2)森林的存在是否能调蓄洪水,但是以往的研究结果往往由于研究区域的不同以及实测资料的不足而使得研究结论存在着较多的争议^[6-13]。即使在相同的研究区域取得了长系列的实测资料,仅仅依靠简单的数学方法进行分析,却得不到理想的结果。因此使用流域水文模型模拟森林变化过程中的水文过程是行之有效的方法,此法可进一步加深了解森林与水的关系,了解森林的作用。而将模型模拟结果加以分析得出的成果,可为植树造林、森林结构调整等方面提供重要的理论依据。

流域模型最突出的特点是对径流过程作连续模拟。见诸于森林水文论著的流域模型有 Tank、Stanford IV、API、SDI、CATPRO、BURP、ECOWAT、WATBAL、ARZMLT、BROOK、SLUICES 等。它们在水文界或森林水文研究中都曾有过不凡的表现。然而,由于下面 4 方面的原因却制约了它们在长防林地区的实际应用。第一,长防林地区涉及范围广,气候、地质等条件复杂多样,而这些模型又太过地区化,缺乏一般性;第二,描述森林作用的参数不够准确,例如 Tank 模型便缺少描述森林功能的子系统;第三,模型参数特别是地区性经验参数太多,最多者达 75 个;第四,输入矩阵过大,长防林地区除个别实验站所在地区可以满足输入要求外,其余广大地区的实测资料均不能满足输入要求。任何一个降雨径流模型,产流模块亦即(或)流域土壤水分的增减规律及其模拟都是核心组件。至于模型在地区上的组装形式,采用集总式设置还是分布式设置,视面临所要解决的问题、资料条件等而定,特别要遵循“能简不繁”的原则。在观测实验资料很完备的地区,采用分布式模型能够获得世人所追求的“理想”结果。目前,我国绝大多数流域受资料条件所限,一般采用集总式模型进行水文模拟。否则,因资料不足或操作者不同,将会出现结论相左的尴尬局面。长防林地区气候、地质背景复杂多样,分区规律明显,兼之森林特征资料不多,只有采用分散式与集总式相配合的模型结构方式,才能达成揭示森林水文效应机理及其分区规律进而拟定评价指标的目的。本文在林冠截留、蒸散发、入渗、洪水过程、径流成分等单项分析的基础上,综合分析并模拟两个流域森林变化影响下的水文过程。

1 研究区概况

长防林区一直是森林水文研究的重点区域,该区涉及范围广,气候、地质等条件复杂多样,且除个别流域设置有野外观测站可以满足气象、水文及森林资源指标等数据要求外,其余广大地区的实测资料均较为欠缺,本文选取了两个具有典型长防林体系特征且建有森林生态定位观测站点、野外实测数据较为丰富的流域作为研究区域。

1.1 刘家河流域的基本概况

刘家河流域位于绵阳市刘家乡,东经 104°52′—105°03′,北纬 31°24′—31°44′,流域控制面积 249km²,属于小流域,是典型的四川盆地低山丘陵区。地貌以丘陵低山为主,海拔高度 485—627m,地层简单,母岩主要为砂岩,土壤主要为老冲积黄壤和紫色土为主,部分为姜石黄壤和灰白砂土。气候属亚热带季风气候,年均温 20℃,年降水量 1000mm 左右,主要集中在 6—9 月份,无霜期 300d 以上。本区域的防护林是 20 世纪 80 年代以来,通过封山育林形成的次生林和营造的人工林,林分处于中状龄林阶段。次生林主要为马尾松(*Pinus massoniana*)、柏木(*Cupressus funebris*)、麻栎(*Querus acutissima*)纯林或其混生的针阔混交林;人工林主要为桉木(*Alnus cremastogyne*)-柏木混交林,或在林隙中补植柏木、湿地松(*Pinus elliottii*)等树种。

1.2 平通河流域的基本概况

平通河流域位于四川盆地西北边缘高山深谷褶断带,北川和平武县境内,为涪江流域的一级支流,流域控制面积 1067km²,属中尺度流域。该流域范围在东经 104°14′—104°43′,北纬 31°56′—32°21′。发源于四川省

平武、松潘、北川 3 县交界海拔 3269m 的六角顶东坡,自北川县甘溪乡长滩子海拔 575m 处流入江油县境,控制面积 1067km²。域内多为深切低中山河谷地貌、中山地貌,流域地势由东南向西北逐渐抬升,处于四川盆地川西高山深谷的过渡地带。主要出露岩层是志留系页岩、片岩,龙门山褶皱带由东北向西南斜穿该流域,流域地层变质严重,片理和岩中节理与裂隙十分发育,透水性强。土壤主要为山地黄壤、黄棕壤。流域内沿河两岸及豆叩以下区域是主要农耕区,多为夏种冬闲一年一熟的坡面旱地。从河谷向分水岭、从低山向中山,植被类型依次均为山地次生灌木林、山地常绿阔叶林、山地落叶阔叶林、山地针阔混交林、山地暗针叶林。属于亚热带湿润季风气候,年均降雨量 942.1 mm,年平均气温 14℃,年均径流深 645.8 mm。

2 研究方法

2.1 研究方法

本文采用的“森林流域水文模型”(Forest Catchment Hydrology Models,简称 FCHM)^[14-16]是以流域内从降水到径流全过程中各种水文物理规律及相互间的联系为基础,链入森林对水分调蓄、转换、传递功能的重组作用,辅以严密的逻辑推理和数学描述而构成的一个综合分析系统,其中包含转换函数、模型参数和状态变量^[17]。其设计思想为:一个流域通常包含有诸如水面、路面、岩石面、农耕地、荒坡、森林地等面积,各类面积的结构不同导致对流域响应的贡献不同。例如:水面的降雨损失很小,径流成分单一,而林地的干湿化过程与径流成分就复杂和丰富很多。显然有必要对不同性质的面积做出科学的切和实际的模拟^[18](图 1)。

2.2 资料收集及模型参数率定

收集了 1967—2006 年平通河流域和刘家河流域内所有水文站的日平均降水量、日平均蒸发量资料和参数率定周期各年份内的逐日平均径流量资料以及此期间的森林调查资料等资料用于连续模拟平通河流域和刘家河流域的森林水文变化过程。选取的长系列水文资料,涵盖了流域丰水期、枯水期等多个时期的水文特征,避免了在单一的丰水期或者枯水期进行计算,因此得出的结果将更具有说服力。首先应初定模型参数,其中流域蒸散发能力 K_e 最为重要。流域蒸散发能力反映了流域蒸散发气候特征,是计算蒸散发量的基础值,此值很难直接测定,通常是依据流域内某点或某几点的水面蒸发量 E_w 乘以折算系数获得。参数初定以后,将初定参数代入模型,选择已知森林覆盖率对应的实测流量水文年段,率定模型参数。模型参数率定周期年份、森林普查资料及水文、气象资料观测站点概况如表 1 所示。

参数率定之后,并不能马上进行模拟计算,必须依据国家部颁标准《水文情报预报规范》SL250—2000 之规定,以“确定性系数” D_y 为目标函数考核模型的准确度,通过率定获得的参数必须进行严格的检验,只有检验合格后模型参数才能应用于模拟流域。所谓检验合格就是检验周期的几值既接近率定周期的 D_y 值,又要

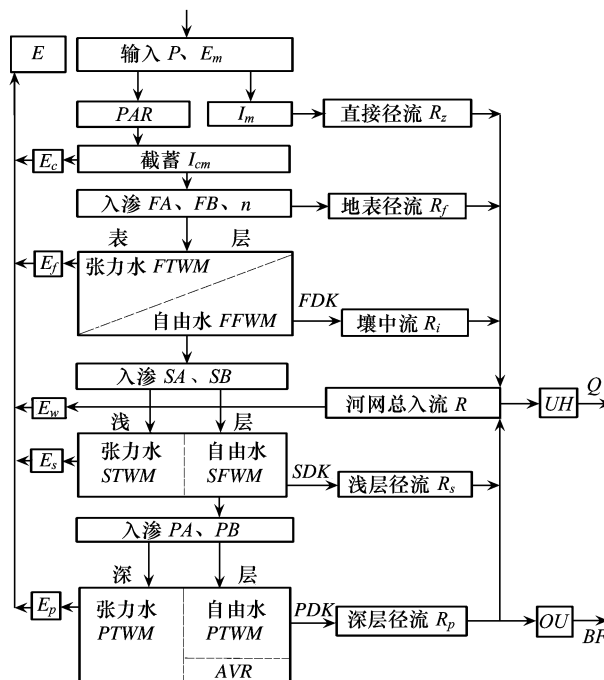


图 1 FCHM 流程图

Fig. 1 Process of FCHM

P : 降雨量(mm); PAR : 流域不透水面积; I_m : 流域透水面积; E 、 E_w 、 E_e 、 E_f 、 E_s 、 E_p : 蒸散发量总、水面蒸发量、林冠蒸散发量、表层、浅层和深层界面蒸散发量(mm); R 、 R_z 、 R_f 、 R_i 、 R_s 、 R_p : 河网总入流、直接径流、地表径流、壤中流、浅层和深层径流(mm); I_{cm} : 枝叶截蓄容量(mm); $FTWM$ 、 $FTWC$: 表层张力水容量与蓄量(mm); $FFWM$ 、 $FFWC$: 表层自由水容量与蓄量(mm); FDK : 表层日出流系数; FA 、 FB : 地表界面入渗参数; n : 入渗分布函数方次; $STWM$ 、 $STWC$: 浅层张力水容量与蓄量(mm); $SFWM$ 、 $SFWC$: 浅层自由水容量与蓄量(mm); SDK : 浅层日出流系数; SA 、 SB : 浅层界面入渗参数; $PTWM$ 、 $PTWC$: 深层张力水容量与蓄量(mm); $PFWM$ 、 $PFWC$: 深层自由水容量与蓄量(mm); PDK : 深层日出流系数; PA 、 PB : 深层界面入渗参数; AVR : 蒸发无效水参数; OU : 流域不闭合参数

满足国家有关规范对 D_y 值的要求。特别指出,率定周期与检验周期绝对不能重叠^[19]。本研究中各流域率定周期的 $D_y=0.91$,达国家部颁规范的甲等水平。模型参数经过率定并检验以后,用于模拟平通河流域和刘家河流域连续 40a 的森林变化下的水文过程。

表 1 模型参数率定周期及数据来源站点概况
Table 1 Test cycle of model parameters and data source

区域 District	普查年 Year	覆盖率/% Forest cover rate	参数率定 年份 Cycle	水文站 站名 Station name	测站地点 Location	东经 Longitude	北纬 Latitude	面积权重 Area proportional
平通河流域 Pingtonghe Catchment	1973	38.0	1972	堡子场	平武县山峰乡	104°29′	32°12′	0.24
			1973	同兴	平武县赤水乡	104°26′	32°12′	0.24
			1974	徐塘	平武县徐塘乡	104°30′	32°18′	0.20
	1988	33.8	1985	豆叩	平武县豆叩乡	104°36′	32°06′	0.12
			1986	桥头	平武县桥头乡	104°42′	32°08′	0.13
刘家河流域 Liujiuhe Catchment	1977	5.1	1987	甘溪	北川县甘溪乡	104°40′	31°57′	0.07
			1976	刘家	绵阳市刘家乡	105°01′	31°27′	0.5
	1988	13.0	1977					
			1987 1988	魏城	绵阳市魏城镇	104.57′	30°33′	0.5

3 结果与分析

3.1 模型参数率定

平通河流域率定参数见表 2。

表 2 平通河流域率定参数
Table 2 Model parameters for pingtonghe catchment

参数 Parameters	FR/%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
FTWM	13	18	23	30	35	40	45	49	50	51	51
FFWM	64	78	93	106	118	130	139	146	149	150	150
FDK	0.110	0.115	0.125	0.139	0.158	0.183	0.204	0.220	0.232	0.238	0.240
FA	36.7	31.0	27.0	24.0	21.6	19.5	18.0	16.5	15.0	14.0	13.5
FB	3.00	2.65	2.38	2.14	1.92	1.73	1.55	1.40	1.25	1.12	1.00
STWM	34	40	46	52	57	61	65	68	70	70	70
SFWM	70	93	114	136	155	172	185	195	200	200	200
SDK	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
SA	55.0	49.5	45.6	43.0	41.0	39.3	38.0	37.0	36.5	35.8	35.2
SB	4.5	4.3	4.12	3.99	3.83	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2
PTWM	43	48	55	60	64	69	72	74	75	75	75
PFWM	151	175	196	212	225	232	233	234	234	234	234
PDK	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
PA	59.0	52.7	49.0	46.6	44.7	43.2	42.1	41.5	41.0	40.6	40.5
PB	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0
K_{et}/K_{es}	1.00	0.98	0.91	0.78	0.67	0.61	0.575	0.565	0.565	0.565	0.565

FR: Forest Cover Rate; FTWM: Capacity of Surface Tension Water; FFWM: Capacity of Surface Free Water; FDK: Surface Daily Runoff Coefficient; FA、FB: Surface Infiltration Coefficient; STWM: Capacity of Shallow Tension Water; SFWM: Capacity of Shallow Free Water; SDK: Shallow Daily Runoff Coefficient; SA、SB: Shallow Infiltration Coefficient; PTWM: Capacity of Deep Tension Water; PFWM: Capacity of Deep Free Water; PDK: Deep Daily Runoff Coefficient; PA、PB: Deep Infiltration Coefficient; K_{et}/K_{es} : Evapotranspiration capacity Coefficient.

3.2 模拟结果分析

表 3 数据全部为模型输出结果。

表 3 刘家河流域率定参数
Table 3 Model parameters for Liujiahe catchment

参数 Parameters	FR/%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
FTWM	35.0	36.5	37.7	38.2	38.7	39.2	39.7	39.9	40.0	40.0	40.0
FFWM	70	79	85	89	93	97	99	100	100	100	100
FDK	0.40	0.405	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
FA	60	50	43	38	33	30	27	24	22	21	20
FB	4.5	4.1	3.7	3.3	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0
STWM	30.0	33.0	35.0	36.4	37.4	38.3	38.9	39.4	39.7	39.9	40.0
SFWM	40	44	47	49	50	50	50	50	50	50	50
SDK	0.03	0.031	0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.04
SA	80	77	75	73	72	71	71	70	70	70	70
SB	7.0	6.7	6.4	6.1	5.8	5.6	5.4	5.2	5.1	5.0	5.0
PTWM	30.0	31.2	32.0	32.7	33.4	34.0	34.4	34.7	34.9	35.0	35.0
PFWM	20	20	21	22	23	24	25	25	25	25	25
PDK	0.001	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.002
PA	90	89	87	86	84	83	82	81	80	80	80
PB	7.50	7.45	7.40	7.35	7.30	7.25	7.20	7.15	7.10	7.05	7.00
K_{et}/K_{es}	1.000	0.967	0.944	0.933	0.921	0.913	0.904	0.899	0.894	0.880	0.88

3.2.1 林冠截留量

森林对降水调节作用的首要层次表现为林冠对降水截留过程,林冠截留的降水主要在林冠的蒸散发作用下被消耗。模拟结果显示,平通河流域森林地平均林冠截留量为 204.9mm,其中 1969 年林冠截留量为最大 264.5mm,1999 年为最小 142.7mm;刘家河流域森林地平均林冠截留量为 248.8mm,其中 1975 年为最大 308.5mm,1999 年为最小 189.9mm,由此可以看出刘家河流域森林平均林冠截留量大于平通河流域森林。林冠截留量的大小除了与林分类型以及森林分布均匀度有关之外,还与森林的蒸散发能力有密切关系,林冠截留的降水主要在林冠的蒸散发作用下被消耗。因此在降水量相同的情况下,蒸散发能力越强,则林冠截留量也会越大。

3.2.2 流域蒸散发

模拟结果显示,平通河流域森林地蒸散发能力为 292.4mm,年蒸散发总量为 289.3mm,其非森林地蒸散发能力为 400.2 mm,年蒸散发总量为 373.3mm;刘家河流域森林地蒸散发能力为 641.3mm,年蒸散发总量为 584.1mm,非森林地蒸散发能力为 694.5 mm,年蒸散发总量为 530.9mm。由上可知平通河流域森林蒸散发能力随着森林覆盖率增加而减小,总蒸散发量也随之减小;而刘家河流域则情况相反。蒸散发能力影响着蒸散发总量,而蒸散发能力的大小又受流域的能量条件和供水条件的影响。

3.2.3 界面入渗

在 FCHM 中,将地面称为地表界面,表层与浅层间的界面称为浅层界面,浅层与深层间的界面叫做深层界面,深层底部叫做下界面。水流在界面的作用下分解成不同的分量,这种分水过程称之为“界面水分效应”。各界面和各土层的结构及其供水条件不一样,水分效应也就不一样;有林地与无林地同名界面的水分效应当然也不一样(表 4)。

平通河流域都属于中度透水土层,刘家河流域属于弱度透水土层,故最大入渗能力 f_m 与稳定入渗 f_c 的比值较大、入渗能力沿垂向逐层减弱;森林地与非森林地比较,森林地的入渗容量增大, f_c 增大, f_m 变小,入渗能力变

化趋于平缓。森林地与非森林地的地表界面入渗能力出现交叉,而深层界面入渗能力变化甚微,表明森林改善入渗性能所达及的深度主要集中在表层和浅层。刘家河流域与平通河流域比较,地表界面入渗能力前者大与后者,这与前者表土为砂岩反应而后者表土为泥岩反应有关,至于深层界面的入渗能力则是后者大于前者,这是因为平通河流域基岩破碎度大于刘家河流域所致。刘家河流域降水入渗后将主要集中在表层和浅层界面,因此将成为该流域蒸散发的主要水分提供者;而平通河流域降水入渗后能透过破碎的岩层,直达深层,成为“蒸发无效水”,并将最终汇入河流。

表 4 流域平均入渗能力特征量表
Table 4 Average infiltration capacity of catchment

流域 Catchment	界面 Interface	覆盖 Coverage	张力水容量 /mm Tension water capacity	自由水容量 /mm Free water capacity	日出流系数 Daily runoff Coefficient	最大入渗 参数 Max infiltration parameters	入渗方次 参数 Involution parameters	最大入渗率 f_m / (mm/h) Max infiltration rate	稳定入渗率 f_c /(mm/h) Stable infiltration rate
平通河流域 Pingtonghe Catchment	表层	森林地 Forest	51	150	0.24	13.5	1.0	70.8	3.37
		非森林地 Non-Forest	13	64	0.11	36.7	3.0	141.5	2.0
	浅层	森林地 Forest	70	200	0.05	35.2	3.2	7.8	0.13
		非森林地 Non-Forest	34	70	0.04	55.0	4.5	6.0	0.08
	深层	森林地 Forest	75	234	0.003	40.5	4.0	0.71	0.009
		非森林地 Non-Forest	43	151	0.002	59.0	5.0	0.44	0.005
刘家河流域 Liujahe Catchment	表层	森林地 Forest	50	100	0.45	20.0	2.0	51.7	2.46
		非森林地 Non-Forest	35	70	0.40	60.0	4.5	89.9	1.47
	浅层	森林地 Forest	40	50	0.04	70.0	5.0	6.0	0.13
		非森林地 Non-Forest	30	40	0.03	80.0	7.0	4.1	0.05
	深层	森林地 Forest	35	25	0.002	80.0	7.0	0.17	0.002
		非森林地 Non-Forest	30	20	0.001	90.0	7.5	0.08	0.0008

3.2.4 森林对径流成分的划分

当流域被森林覆盖以后,由于林冠、枯枝落叶层、根系及林中小动物活动等的影响,改善了土壤的入参与蓄水性能,影响流域产流与坡地汇流特性,改变水源组成比例,促成径流与洪水成分发生变化,使得快速流减少,慢速流增加,地表径流减少,地下径流增机。因此森林对降水入渗过程的改善以及对径流成分的划分,在森林水文过程中占有极其重要的地位。

由模拟结果图 2 可知,在平通河流域,随着 FR 的增加,地表径流 R_f 所占总径流的比例由 17.7% 逐渐减少并趋近于零,壤中流 R_i 则由 20.2% 逐渐减小到 11.7%,而浅层径流 R_s 与深层径流 R_p 则随之增加,且 R_s 与 R_p

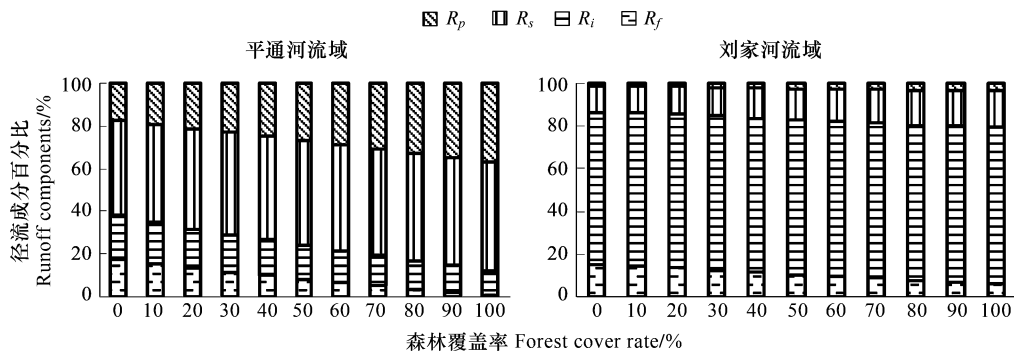


图 2 流域年径流成分随 FR 变化图
Fig. 2 Annual average of runoff components change with forest cover rate

在总径流中所占比例较 R_i 和 R_f 为大,其变化区间分别为 44.8%—50.6% 和 17.3%—37.1%;在刘家河流域,地表径流 R_f 所占总径流的比例随着 FR 的增加由 15.0% 减少到 6.0%,而壤中流 R_i 所占总径流比例最大,且随着 FR 的增加有所减少,但是变化不明显,其变化区间为 71.1%—73.4%,而 R_s 与 R_p 所占总径流的比例不大,随 FR 增加而缓慢增加,其变化区间分别为 12.4%—16.9% 和 1.5%—3.9%。

3.2.5 森林与径流

由模拟结果图 3 可知,在降水量输入不变的情况下,平通河流域年平均径流深将随着森林覆盖率 FR 的增加而增加,并非森林地时的 594.0mm 增加到了森林地 777.4mm,因此该流域森林径流效应成正效应,其效应值为 23.7%;刘家河流域年平均流域径流深则随着 FR 的增加而减少,由非森林地时的 272.2mm 减少到了 250.9mm,即流域径流效应成负效应,效应值为 -8.6%。平通河流域属于高山峡谷区,因此在降水输入中应加上积雪的融化,通过计算得出该流域森林地融雪量为 179.3mm,非森林地融雪量为 78.8mm,由此可知随着 FR 的增加,该流域降水输入量也在随之增加;而刘家河流域不属于高山积雪区,因此无需计算融雪。两个流域呈现不同趋势的径流效应,则是流域被森林覆盖以后,森林对径流成分的划分等综合作用下的效果。

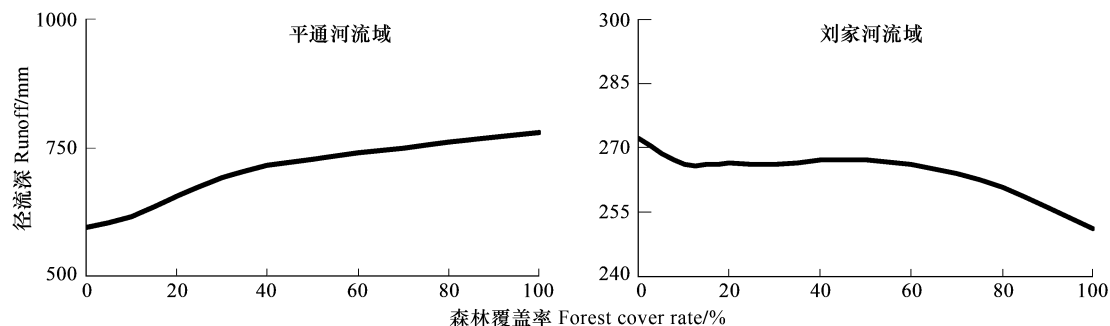


图 3 流域年平均径流深随森林覆盖率变化图
Fig. 3 Annual average of runoff change with forest cover rate

3.2.6 森林与洪水

分别在已知不同森林覆盖率下生成的年最大洪水系列中,选取平通河 81 年 7 月 13 日和刘家河 83 年 7 月 30 日单次洪水过程作为典型洪水,并通过同倍比缩放,得到不同 FR 、不同频率下的设计洪水流量过程,如图 4 所示。

由图 4 可知,两个流域森林都能起到削减洪峰的作用,随着森林覆盖率 FR 的增加,土壤入渗得到改善,地表径流随之减少,又由于使得壤中流随之增加,因此流域快速流减少,慢速流增加,延长了流域汇流时间,洪峰得以削弱。随着 FR 增加,流域不同设计频率下的设计洪峰流量也随之降低。以平通河流域为例,非森林地二十年一遇的洪水设计标准 ($3040\text{m}^3/\text{s}$) 几可作为森林地情况下百年一遇洪水设计标准 ($3380\text{m}^3/\text{s}$)。可以说,该流域在森林覆盖以后,在已有防洪工程的基础上,流域防洪能力将得以较大提高;反之来讲该流域在设计新的防洪工程的时候,其设计标准也会由于森林的存在而得以降低,因此减少了修建防洪工程设施的费用。

4 讨论

森林水文研究至今,森林水文变化过程是研究的焦点,而森林水文过程又集中表现为森林与径流以及森林与洪水之间的关系,影响森林流域水文效应的因素很多,主要是林冠截留、流域蒸散发、界面入渗及径流成分变化等方面的作用。近年来国内外对其做了大量的研究^[2,20-30],其研究表明:当流域被森林覆盖以后,由于林冠、树干、枯落物层对降水的截留作用以及森林土壤的涵养水源作用,可使流域降水得到充分的截留和吸收,地表径流减少,快速流变为慢速流,延迟了流域洪水汇流时间,也削减了洪峰流量^[7-9,25-27],但是森林对洪水的调蓄作用在不同地区会因为土壤、森林覆盖率大小及森林结构等不同而出现一定的差异;而在森林与径流关系方面却存在一定的争议,主要表现为:(1)森林植被的存在增加年径流量^[6-9]。这一观点以原苏联学者

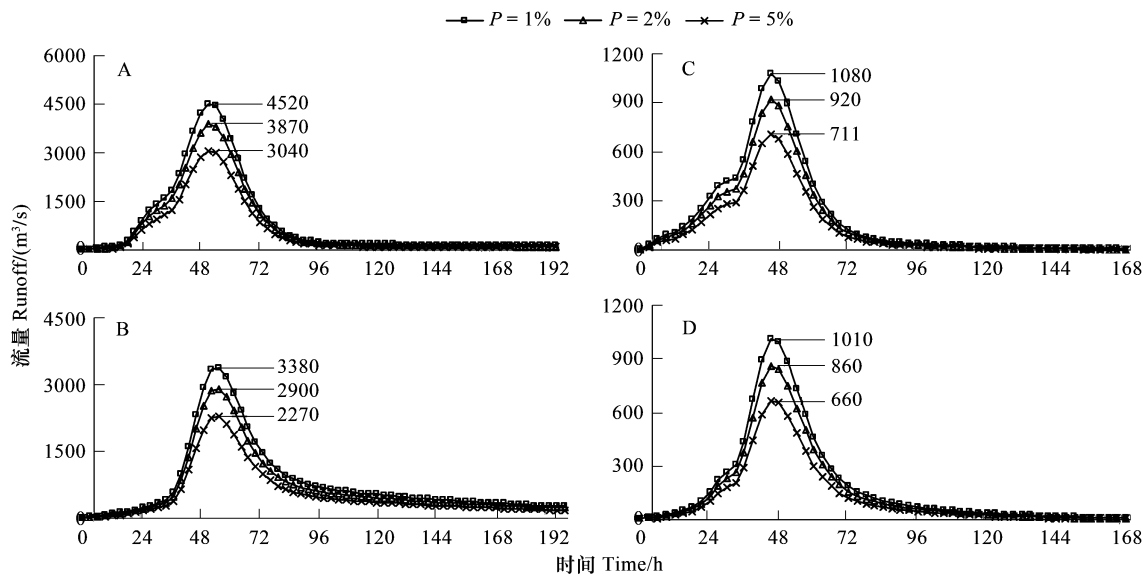


图4 不同频率下的设计洪水过程图

Fig.4 Design flood process of different frequency

A: 平通河流域非森林地; B: 平通河流域森林地; C: 刘家河流域非森林地; D: 刘家河流域森林地

为代表,我国的一些学者也有过相同的结论。原苏联斯莫列斯克、季洛夫和伏尔加河左岸的3个地区的统计资料表明,在相同的气候条件下,有林流域较无林流域径流量增加144 mm,即森林覆被率每增加1%,年平均径流量增加1.1 mm^[6]。(2)森林植被的存在减少年径流量。这一观点以美国和日本学者为代表,国内外其他学者也较多地得出过相似结论^[10-13,20,22-23]。本文选取了长防林区域内两个典型流域作为研究对象,运用森林流域水文模型模拟森林流域植被变化下的水文变化过程,得出了以下结论:①平通河流域随着森林覆盖率FR的增加能够增加流域多年平均径流量,呈径流正效应,且效应明显;而刘家河流域则相反,呈负效应,效应较明显。②两个流域由于森林的存在,都能起到削减洪峰的作用,从而提高了流域防洪能力。

平通河流域和刘家河流域同属于长江上游防护林区,但是却表现出了两种不完全相同的森林与径流、洪水效应变化趋向,究其原因不外是两区的流域地质结构、气候条件、森林改造流域和影响气候的深刻程度不一样所致。

就两个流域的概况而言,平通河流域属于川北台陷区,地层以白垩系与侏罗系砂岩、泥岩为主,间有砾岩,体现泥岩特性,岩层产状由北向南逐渐平缓。刘家河流域属于川中台拗区,地层以白垩系与侏罗系砂岩、泥岩为主,组成砂岩以及砂岩与泥岩互层结构,体现砂岩特性,岩层完整产状平缓,其破碎度较川中台陷区为小。两个流域都属于弱容水岩层,但因层间结构与破碎度有差异,前者属于中度透水流域,且应划入湿润气候区,而后者属于弱度透水区域,且具有偏干旱的气候特点。从产流角度出发,两者分属于两个产流区,其径流成分组成不同,因此森林水文过程特征必然会有差异。

从模拟结果也可看出,平通河流域在森林覆盖以后,径流成分以浅层径流 R_s 和深层径流 R_p 为主,因此 R_s 和 R_p 为该流域森林涵养水分的主要来源;刘家河流域则相反,径流成分以壤中流 R_i 为主,浅层径流不多,占总径流量的12.4%—16.9%,而深层地下径流 R_p 很少,仅占1.5%—3.7%,属于自然资源贫乏而又容易出现洪患的不良水文环境区,因此该流域森林涵养水份的能力不如平通河流域,且 R_i 的增加为流域蒸散发提供了更好的水分条件,也是该流域蒸散发量随FR增加而增加的一个原因之一。因此就径流成分变化来看,不同的流域在覆盖森林后表现出不同变化趋势的森林水文变化趋势并非偶然;而森林的存在也改善了地表界面的入渗性能,地表径流中的大部分经由表层而被转换成地下径流(R_s 和 R_p),快速径流减少、慢速径流增多,有削减洪峰和增加枯季径流的效果,提高了流域防洪能力。

径流成分的划分在森林水文变化过程研究中也具有十分重要的地位,可以认为,若忽视了对径流成分的研究,森林水文变化过程中的一些关键问题则无法研究清楚。首先,当流域覆盖森林后,径流成分改变与否、改变幅度大或小,从一个重要的侧面揭示出森林对流域调蓄、转换与传递水分功能的调整强度;其次径流组成和森林改变径流组成对于森林径流效应是正是负关系重大;再次,就河网总入流而言,径流与洪水一般由快速、中速和慢速径流成分组成,森林通过改变径流组成而改变径流年内分配、年际变化和洪水形态。这也说明了不同流域森林对洪水的调蓄作用不完全一致,而不同流域森林植被变化对流域年平均径流量的影响则可能出现不同的结果。

众所周知,一个闭合流域的多年水量平衡式为:

$$R_0 = P_0 - E_0$$

式中, R_0 为多年平均径流量(mm); P_0 为多年平均降水量(mm); E_0 为多年平均蒸发量(mm)。

由上式可知,所谓森林径流正负效应,实际上归结为流域被森林覆盖后蒸散发量是减少还是增加的问题。如果流域蒸散发量增大,势必引起径流量的减少;而在降水输入不变的条件下,流域蒸散发量的大小取决于能源条件和供水条件,以我国湿润地区为例,森林对于以热效应为主的太阳红光与近红外辐射波段的反射率高达 58%,兼之森林有降低风速、保持空气湿度、降低温度等功效,致使蒸散发能力下降,仅从能量供应角度看,森林将造成蒸散发量减少,径流量增加。而就供水条件而言,当森林因蒸散发能力减小而增加的径流量,不足以低偿因森林供水条件改善蒸散发量增大而减少的径流量时,森林流域径流量就将减少。因此,流域蒸散发是一个重要的影响因子。流域蒸散发量的大小取决于能源条件和供水条件。平通河流域与刘家河流域森林地蒸散发能力均小于非森林地蒸散发能力,而且平通河流域森林改善气候的功能强于刘家河流域。仅仅从能量角度来看,森林径流效应必然是正效应。然而,事实是一些地区森林径流效应确实又是负效应,这又涉及到供水量及供水过程,即与流域的结构和调节性能有关。

当流域覆盖森林以后,森林改善了入渗,平通河流域本身属于中度透水流域,基岩较为破碎,径流成分得以从地表径流向浅层径流和深层径流转化,且本文使用水文模型中,加入了“蒸发无效水”概念,认为深层径流以下的水分将不提供给流域蒸散发使用,并将最终缓慢汇入河流,补给流域径流,因此提供给流域蒸散发的水量将会随森林覆盖率的增加而减少;而刘家河流域基岩较完整,透水性不强,径流主要从地表径流向壤中流转化,这都为流域蒸散发提供了大量水分来源。由此可知,随着森林覆盖率的增加,两个流域的能量条件虽然得以减弱,但是平通河流域蒸散发所需供水量也减少了,因此蒸散发总量将逐渐减少,从而实现流域径流的正效应;而刘家河流域则恰好相反,其丰富的壤中流将为该流域蒸散发提供充分的水分,因此流域蒸散发总量将随着森林覆盖率的增加而增加,使得流域径流呈现负效应。

本文模拟结果中得出平通河流域森林径流正效应,也可通过某时段内该流域实测资料和参照流域实测资料进行验证,中科院成都山地所^[31]对长江上游森林水文效益进行评价,其中对川江流域各水文观测站实测资料进行了整编,摘录其部分资料见表 5。

表 5 对照流域年降雨径流特征值

Table 5 Eigenvalue of rainfall and runoff in comparison catchment

流域 Catchment	时间 Time	森林覆盖率/% Forest cover rate	年降雨量/mm Rainfall	平均径流量/(m ³ /t) Average runoff	径流系数 Runfall coefficient
岷江上游 Upper Minjiang River	20 世纪 40 年代	35	813	484	0.822
	20 世纪 50 年代	30	800	467	0.817
	20 世纪 70 年代	18.8	785	432	0.780
平通河流域 Pingtonghe catchment	20 世纪 60 年代	—	1005	306	0.797
	1973	38	987	281	0.752
	1988	33.8	963	271	0.743

由表 5 可知,选择岷江上游区域作为对照,该区域 20 世纪 40 年代与 20 世纪 70 年代相比较,森林覆盖率下降明显,其对应的平均径流量也随之减小,呈正效应趋势;而平通河流域亦呈相同变化趋势。无论是平通河流域还是刘家河流域,其流域水文站实测数据也只有 40 多年,在水文学上此时段并不太长,为了更准确的预测并验证流域森林水文效应,则还需更长时段的实测数据支持,因此,进一步加强野外观测站点,收集更长时段实测资料,则是将来工作的重点和研究的基础。

总的来说,森林覆盖流域以后,可以提高流域防洪能力,同时也能改善流域气候,这是应该得到肯定的。但是无论流域径流效应是正或是负,都应理性对待,不可片面的认为“正”即是好而“负”即不好,毕竟森林的生态服务功能是多方面的,因此不可以偏概全。

5 结语

利用流域水文模型模拟森林水文效应,是研究森林水文最行之有效的办法之一,通过此项研究,可加深人类对森林的了解,对以后的植树造林、林分结构优化等提供借鉴和帮助。加强对流域径流、洪水的实测,并利用实测数据与模拟数据不断的耦合,可以优化模型结构,使之精度达到更高,使今后水文预报等工作能得出更准确的结果。

References:

- [1] Zhou X F, Zhao H X, Sun H Z. Proper assessment for forest hydrological effect. *Journal of Natural Resources*, 2001,16(5):420-426.
- [2] Nakano Hideaki. *Trans. Forest Hydrology*. Li Y S. Beijing: China Forestry Press,1983: 1-30.
- [3] Zhang J L, Li Q X. An overview of forest hydrology research in foreign countries. *World Forestry Reserch*, 1988,(4):18,41-47.
- [4] Gao H D. A overview on forest hydrology research. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1993,14(2):39-41.
- [5] Liu C M. The Influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1978,33(2): 112-126.
- [6] Ma X H. *Forest Hydrology*. Beijing: China Forestry Press,1993:239-240.
- [7] Jin D L. The effect of forest on hydrology factors. *Yangtze River*,1989,(1):28-35.
- [8] Zhang T Z. Study on the forest hydrology function based on river flow characteristic of Donggou and Xigou in Yongding River. *Resources Science*, 1984,(4):90-98.
- [9] Ma X H. Effects of forest harvesting on the stream flow and sediments in the upper reach of Minjiang River. *Resources Science*, 1980,(3):78-87.
- [10] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982,55:3-23.
- [11] Fahey Y, Rowe L K. Land use impacts on Waters of New Zealand. New Zealand: New Zealand Hydrological Society Inc, 1992: 265-284.
- [12] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 1996,176:79-95.
- [13] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies-an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, 1993, 145:217-230.
- [14] Chen Z M, Ren S X. FCHM structure and snowmelt model. *Sichuan Water Power*, 1994,13(1):11-15,96.
- [15] Chen Z M, Ren S X. Models for Water Storage Evaporation and Diffusion in Branches and Leaves, Moisture Effects of Interface-Study on Hydrological Models of Forest Basin(II). *Sichuan Water Power*, 1994,13(2):21-27.
- [16] Chen Z M, Ren S X. Determination of Model Parameters and Examples of Computation — Study on Hydrology Models of Forest Basin(III). *Sichuan Water Power*, 1994,13(3):56-62.
- [17] Xiang C H, Jiang J M, Chen Z M. A Study on Forest Hydrological Effects in the Pingtonghe Catchment. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1999,23(3):79-82.
- [18] Wang J X, Mu C L, Peng P H, Hu Z Y. Monitoring and Evaluation of ecological benefit for protection forest system in the middle and upper reaches of Yangtze River. *Sichuan Science and Technology Press*, 2006:189-219.
- [19] Chen Z M. The valuation and forecast of hydrological effects of forest in the Zhenzi interval of Minjiang River *Journal of Chendu University of Science and Technology*, 1992,64(4):73-78.
- [20] Ma X H. Preliminary study on hydrologic function of fir forest in Miyaluo region of Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1987,23(3):253-265.
- [21] Wang L X, Zhang Z Q. Advances in the study of Ecohydrological effects from vegetation changes. *World Forestry Reserch*, 1998,11(6):14-23.
- [22] Liu S R, Wen Y G. Study on the eco-hydrological function law of forest ecosystem in China. Beijing: China Forestry Press, 1996:199-228.

- [23] Chen J F, Pei T F, Tao X X, Liu S D, Niu L H. Effect of unsymmetrical cutting along both river slopes on rainstorm-runoff process. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 210-214.
- [24] Zhou X F. The positioning study on the forest ecosystem system (Pilot). Harbin: Northeast Forestry University Press, 1991: 1-25.
- [25] Sun T H, Pei T F. Analysis on the Reasons and Prevention Measures of flood hazard in forest watershed. *Disaster Reduction in China*, 1996, 6(3): 35-38.
- [26] Zhang B X, Feng G Z. Analysis on the flood retention function and runoff processes characteristic of forest. *Journal of China Hydrology*, 1985, (2): 37-44.
- [27] Sun G. A discussion about the effect of forests on river run-off and its research methods. *Territory & Natural Resources Study*, 1987, (2): 67-71.
- [28] 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. Kyoto: International Forestry Research Organizations, 1981: 297-308.
- [29] Hewlett J D. Principles of Forest Hydrology. Athens: The University of Georgia Press, 1982: 1-40.
- [30] Chang M. Forest Hydrology: An introduction to water and forest. New York: CRC Press, 2002: 1-35.
- [31] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Construction of Shelterbelt and Environmental Characteristics in Upper Yangtze. Beijing: Science Press, 1992: 133-134.

参考文献:

- [1] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 420-426.
- [2] 中野秀章. 森林水文学. 李云森译. 北京: 中国林业出版社, 1983: 1-30.
- [3] 张建列, 李庆夏. 国外森林水文研究概述. *世界林业研究*, 1988, (4): 41-47, 18.
- [4] 高华东. 森林水文研究综述. *四川林业科技*, 1993, 14(2): 39-41.
- [5] 刘昌明. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-126.
- [6] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993: 239-240.
- [7] 金栋梁. 森林对水文要素的影响. *人民长江*, 1989, (1): 28-35.
- [8] 张天曾. 从永定河东沟西沟河川径流特征看森林植被的水文作用. *资源科学*, 1984, (4): 90-98.
- [9] 马雪华. 岷江上游森林的采伐对河流流量和泥沙悬移质的影响. *资源科学*, 1980, (3): 78-87.
- [14] 陈祖铭, 任守贤. FCHM 结构与融雪模型——森林流域水文模型研究之一. *四川水力发电*, 1994, 13(1): 11-15, 96.
- [15] 陈祖铭, 任守贤. 枝叶截蓄与蒸散发模型及界面水分效应——森林流域水文模型研究之二. *四川水力发电*, 1994, 13(2): 21-27.
- [16] 陈祖铭, 任守贤. 模型参数确定与计算实例——森林流域水文模型研究之三. *四川水力发电*, 1994, 13(3): 56-62.
- [17] 向成华, 蒋俊明, 陈祖铭. 平通河流域的森林水文效应. *南京林业大学学报*, 1999, 23(3): 79-82.
- [18] 王金锡, 慕长龙, 彭培好, 胡振宇. 长江中上游防护林体系生态效益监测与评价. *四川科学技术出版社*, 2006: 189-219.
- [19] 陈祖铭. 岷江镇紫区间森林水文效应评价与预测. *成都科技大学学报*, 1992, 64(4): 73-78.
- [20] 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究. *林业科学*, 1987, 23(3): 253-265.
- [21] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展. *世界林业研究*, 1998, 11(6): 14-23.
- [22] 刘世荣, 温远光. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 199-228.
- [23] 陈军锋, 裴铁璠, 陶向新, 刘四旦, 牛丽华. 河流两侧坡面非对称采伐森林对流域暴雨经历过程的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 210-214.
- [24] 周晓峰. 森林生态定位研究 (第一集). 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1991: 1-25.
- [25] 孙铁珩, 裴铁璠. 森林流域洪涝灾害成因分析与防治对策. *中国减灾*, 1996, 6(3): 35-38.
- [26] 张炳勋, 冯国章. 林地拦洪作用及产流特点的分析. *水文*, 1985, (2): 37-44.
- [27] 孙阁. 森林对河川径流影响及其研究方法的探讨. *国土自然资源研究*, 1987, (2): 67-71.
- [31] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 长江上游环境特征与防护林体系建设 (川江流域部分). 北京: 科学出版社, 1992: 133-134.