

考虑森林植被影响的小流域降雨径流模型

范世香¹, 程银才¹, 高 雁¹, 李晓晏²

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东泰安 271018; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 在一个面积为 834 km² 的森林流域上, 采用覆盖率和林木蓄积量作为森林植被影响降雨径流的两个量化指标, 并划分了两个等级: (1) 森林覆盖率 $\geq 60\%$ 且蓄积量 $\geq 5000 \text{ m}^3/\text{km}^2$; (2) 森林覆盖率 $< 60\%$ 且蓄积量 $< 5000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。在构造的模型中, 根据森林植被的两个量化指标, 分别选取了不同的参数。在产流量计算中, 该模型采用了蓄满产流模拟技术, 土壤蓄水量计算采用了二层模式, 流域蓄水容量-面积分配曲线采用了指数函数形式, 即 $a = 1 - e^{KP}$ 。在汇流计算中, 采用了分水源的演算方法, 其中地表水汇流采用了等流时线法与线性水库调蓄相结合的技术, 地下水汇流采用了简化三角形法。经过对模拟计算结果进行比较, 表明该模型不仅具有较好的精度, 而且还能大致反映出两种不同森林植被条件对涵养水源、调节洪水的不同作用效果。该模型具有较强的实用性, 能够为森林水文功能的深化研究起到借鉴作用。

关键词: 流域; 覆盖率; 蓄积量; 产流; 汇流

文章编号: 1000-0933(2008)05-2372-08 中图分类号: Q142, Q948, S718.5 文献标识码: A

A rainfall-runoff model associated with forest vegetation in a small watershed

FAN Shi-Xiang¹, CHENG Yin-Cai¹, GAO Yan¹, LI Xiao-Yan²

1 College of Water Resources & Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2372 ~ 2379.

Abstract: In order to evaluate the impacts of forest vegetation on rainfall-runoff in a forest watershed in area of 834 km², two quantitative indexes of forest cover, cover ratio and timber volume were adopted, and they were divided into two grades: (1) forest cover ratio $\geq 60\%$ and timber volume $\geq 5000 (\text{m}^3/\text{km}^2)$; (2) forest cover ratio $< 60\%$ and timber volume $< 5000 (\text{m}^3/\text{km}^2)$. Different parameters were selected in the proposed mode in accordance with the two quantitative indexes. The simulation technique of filled-up runoff generation was applied to the calculation of runoff, and the two-layer simulation of evapotranspiration was applied to the calculation of soil water storage in watershed. An exponential equation i. e. $a = 1 - e^{KP}$ was proposed to describe the relationship between the water storage capacity and the relative filled-up area in watershed.

The different runoff components were considered in order to calculate the flood hydrograph, therefore, two routing methods were utilized, namely, the technique of equal time line of flow with regulation of linear reservoir and the simplified triangle hydrograph were adopted for surface and underground runoff of concentration simulation respectively. Comparing the simulation results with the observed data indicates that the proposed model not only is high in accuracy, but also reflects the effects of the two different forest indexes on water conservation and the flood regulation on the whole. The model is practical and will play important rule in farther study of the forest hydrological function.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871019); 山东农业大学科技基金资助项目(23091)

收稿日期: 2007-01-17; 修订日期: 2008-01-18

作者简介: 范世香(1958 ~), 男, 山东济南人, 教授, 主要从事生态水文与水资源研究. E-mail: fsx1016@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 49871019) and Science and Technology Foundation of Shandong Agricultural University (No. 23091)

Received date: 2007-01-17; **Accepted date:** 2008-01-18

Biography: FAN Shi-Xiang, Professor, mainly engaged in ecohydrology and water resource. E-mail: fsx1016@163.com

Key Words: watershed; cover ratio; timber volume; runoff generation; concentration

森林植被不仅具有重要的生态服务功能,而且还具有重要的水文功能。森林植被的水文功能不仅表现在降雨产流量上,而且还表现在降雨径流过程上,特别是对暴雨洪水的影响,森林植被的调蓄作用更为明显^[1~14]。在现行的降雨径流模型中,通常将森林植被和土壤包气带作为一个整体,一般都没有单独考虑森林植被的影响作用^[15~18,20]。然而,如果流域的森林植被变化或影响较大,那么它对降雨径流的影响就不可忽视,应该考虑将其作为影响指标。尤其是在中小流域,当雨型变化不甚明显、降雨的空间分布较均匀以及雨前土壤含水量差别不大时,森林植被对降雨径流的影响作用就会突显出来。

为了揭示森林植被对降雨径流的影响,特别是暴雨洪水的影响,首要的问题是如何将森林植被定量化。为此,我们提出了将森林植被的数量和质量作为衡量指标:所谓森林的数量,定义为森林覆盖率,它表示流域内有林面积与流域总面积的比值(小数或%);所谓森林的质量,定义为单位面积上的平均蓄积量(或材积量, m^3/km^2)。本文在湿润地区蓄满产流模型的基础上,进一步考虑了森林植被的影响作用,建立了森林流域的降雨径流模型,以期对定量揭示森林植被的水文功能进行了有益的尝试,同时为加深对森林水文与生态服务功能的认识具有重要意义。

1 流域概况

研究流域位于辽宁省清原县境内的浑河(辽河支流)上游,称为红河流域。流域出口控制断面为四道河子水文站,东经 $124^{\circ}56'$,北纬 $42^{\circ}06'$,测站高程 250m,控制面积为 834km^2 ,流域平均海拔为 390m,流域呈扇形。该流域地处温带半湿润的季风气候区,属大陆性山地气候,冬季寒冷而漫长,降水量少且以降雪为主;夏季短暂,降雨量充沛,年均降水量为 776mm,年均蒸发能力为 763mm,年均气温为 7.1°C 。流域内为低山丘陵,植被茂盛,均为次生混交林和人工林,树种以蒙古栎为主,多年平均森林覆盖率 56.7%,多年平均林木蓄积量 $5000\text{m}^3/\text{km}^2$ 左右。流域森林覆盖率和蓄积量变化较为明显,20 世纪 50、60 年代较高,70、80 年代较低,90 年代又有所增加。流域土壤为棕色森林土,耕作层质地疏松,透水性好,在耕作层以下的犁底层,土壤较为密实,孔隙度较小,通透性较差。流域内地下水位较高,特别是河谷两侧地下水位埋深浅,土壤包气带虽然较薄,但却不易干旱。根据上述特点,该流域的产流方式基本符合蓄满产流特征。因此,可以蓄满产流模型为基础进行产流、汇流的模拟计算^[15~20],同时,根据森林覆盖率及蓄积量的不同,对模型参数分别进行了分析优选。

2 产流与汇流模拟计算

2.1 产流量计算

2.1.1 土壤蓄水量计算

土壤蓄水量通过土壤蒸散发进行计算,土壤蒸散发量采用两层计算模式。由于天气状况复杂多变(如晴、少云、多云、阴、雨等),而且在一天中也时常交替变化,所以为了简化和方便计算,通常分为两种情况:(1)日雨量 $<1\text{mm}$ 为晴好天;(2)日雨量 $\geq 1\text{mm}$ 为阴雨天。根据四道河子水文站 20cm 蒸发皿 16 a(1980~1995 年)的观测资料,按晴好天与阴雨天进行统计,折算系数取 0.75,然后换算成实际蒸发能力作为取值^[20],统计折算结果见表 1,表中的 P 为日雨量。

表 1 红河流域蒸散发能力值
Table 1 Evapotranspiration potential of the Honghe watershed (mm/d)

天气情况 Weather state	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
晴好天 Fine day ($P < 1\text{mm}$)	3.5	3.5	3.0	3.0	2.5
阴雨天 Rainy day ($P \geq 1\text{mm}$)	2.2	2.2	1.9	1.9	1.7

流域次降雨径流量平衡为:

$$R = P - (WM - W) \quad (1)$$

式中, P 为降雨量; R 为产流量; WM 为流域蓄水容量; W 为雨初流域蓄水量;均以 mm 计。流域蓄水容量

包括土壤包气带的吸收量、植被截留量及填注损失等,是一个综合参数。由于雨期空气湿度较大,如果降雨历时不是太长,雨期蒸发可以忽略不计(当不能忽略时,可直接从降雨量中扣除)。

根据我国多数湿润地区的经验,蓄水容量一般为 80 ~ 120mm 之间,在二层蒸发计算模式中,通常上层蓄水容量 $\leq 20\%$,下层蓄水容量 $\geq 80\%$ 。通过久旱无雨下大雨的分析技术^[16~19],久旱后 $W \approx 0$,就可以根据降雨径流实测资料由公式(1)推算出 WM 。根据多次符合久旱无雨下大雨的雨洪资料,结合森林植被条件分析,确定流域蓄水容量值,然后根据流域森林植被变化的特点,将其分为上、下二层(流域蓄水容量 = 上层蓄水容量 + 下层蓄水容量),结果见表 2。

本流域属于森林地区,尽管森林植被在 40 多年中经历了较为明显的变化,但这种变化是在多年平均值上下波动,森林覆盖率变化介于 42% ~ 72%,变幅为 30%;蓄积量变化介于 4200 ~ 5800 m^3/km^2 ,变幅为 1600 m^3/km^2 ,相对变幅为 32%。另外,根据各年代的森林调查与分析,森林覆盖率与蓄积量大致成正比。由于影响降雨径流的因素较为复杂(特别是降雨特性),如果森林植被指标划分过细,其影响作用就不太敏感,所以森林植被指标的划分宜粗不宜细。因此,表 2 中的森林植被状况是以多年平均值为界分为两个档次,其中森林覆盖度取整数近似值。

表 2 红河流域蓄水容量值

Table 2 Capacity of water storage in the Honghe watershed(mm)

森林植被状况 Forest vegetation conditions	总蓄水容量 WM Total capacity of water storage in watershed	上层蓄水容量 WUM Storage capacity of upper soil layer	下层蓄水容量 WLM Storage capacity of lower soil layer
森林覆盖率 Cover ratio $\geq 60\%$ 且蓄积量 Timber volume $\geq 5000 \text{m}^3/\text{km}^2$	110	20	90
森林覆盖率 Cover ratio $< 60\%$ 且蓄积量 Timber volume $< 5000 \text{m}^3/\text{km}^2$	120	20	100

土壤包气带蓄水量 W 的逐日消长变化,按以下两式进行计算:

上层 当 $0 \leq WU_{t+1} \leq WUM$ 时,则

$$WU_{t+1} = WU_t + (P_t - R_t) - EM \quad (2)$$

下层 当 $WU_{t+1} > WUM$, 或 $WU_{t+1} < 0$ 时,则

$$WL_{t+1} = WL_t + (P_t - R_t) - EM \times WL_t / WLM \quad (3)$$

式中, WU_t 、 WU_{t+1} 为 t 日始、末土壤包气带上层蓄水量; WL_t 、 WL_{t+1} 为 t 日始、末土壤包气带下层蓄水量; P_t 、 R_t 分别为 t 日的降雨量和径流量; EM 为蒸发能力; WUM 为上层的蓄水容量; WLM 为下层的蓄水容量;均以 mm 计。

计算中,当 $WU_{t+1} \geq WUM$, WL 只有补给,没有蒸发,补给量为 $P - R$; 当 $WU_{t+1} < 0$ 时, WL 只有蒸发消退,没有补给,消退量为 $EM \times WL_t / WLM$ 。

为了消除 W 初始取值造成误差,每年提前从 5 月 1 日开始计算,一直计算到雨洪发生前为止。5 月 1 日的 WU 初始值,视 4 月末有无降雨而定,如有降雨则取实际补给量为 WU 的初始值,如无降雨可假设为 0。 WL 的初始值可取 $WLM/2$ 进行计算。在计算过程中,当 WU 和 WL 大于蓄水容量时,分别以蓄水容量 WUM 及 WLM 为控制。

2.1.2 产流量计算

在辽宁东部山区,流域蓄水容量-面积分配曲线符合指数关系^[16],即:

$$a = 1 - e^{-KP} \quad (4)$$

式中, a 为相对产流面积,以小数计; K 为参数,反映流域蓄水容量-面积分配曲线形状; P 为降雨量, mm。由(4)式可以导出流域产流量计算公式为:

当部分蓄满时

$$R = P - E - (WM - W) [1 - e^{(-KP/WM)}] \quad (5)$$

当全部蓄满时

$$R = P - E - (WM - W) \quad (6)$$

式中, P 、 E 、 R 分别为时段降雨量、蒸散发量和径流量,mm; W 为降雨开始时的实际蓄水量,mm。经过分析优选及参照经验^[15~18],公式(5)中的参数 K 取值为:(1)当覆盖率 $\geq 60\%$ 且蓄积量 $\geq 5000\text{m}^3/\text{km}^2$ 时, $K=1.5$;(2)当覆盖率 $< 60\%$ 且蓄积量 $< 5000\text{m}^3/\text{km}^2$ 时, $K=2.0$ 。

2.2 汇流计算

2.2.1 水源划分

水源的划分就是径流成分的划分,即:将产流量划分成地面径流与地下径流两部分,以便在汇流中采用不同的计算方法。这种划分取决于稳定下渗率 f_c ,通过 f_c 就可以将各时段的地下径流和地面径流从总径流中区分出来。根据本流域历史雨洪资料分析和优选计算^[15~18, 20],稳定下渗率 f_c 取值为:(1)当覆盖率 $\geq 60\%$ 且蓄积量 $\geq 5000\text{m}^3/\text{km}^2$ 时, $f_c=1.75\text{mm/h}$;(2)当覆盖率 $< 60\%$ 且蓄积量 $< 5000\text{m}^3/\text{km}^2$ 时, $f_c=1.30\text{mm/h}$ 。

2.2.2 汇流计算

汇流计算就是将净雨演算成流域出口断面的洪水过程。由于流域面积不太大,地面净雨的汇流计算采用等流时法,在此基础上再考虑流域的调蓄作用,进行一次调蓄修正后得到地面净雨时段单位线,用方程表示如下^[19, 20]:

$$U_n = \frac{\Delta\tau}{k} \sum_{r=1}^{\bar{r}} e^{\frac{-(n-r)\Delta\tau}{k}} \omega(\tau)_r \quad (7)$$

当 $n \leq \frac{T}{\Delta\tau}$ 时, $\bar{r}=n$;当 $n > \frac{T}{\Delta\tau}$ 时, $\bar{r}=\frac{T}{\Delta\tau}$ 。

式中, $\omega(\tau)_r$ 为等流时面积分配曲线第 r 时段的纵坐标,以占全流域面积的%表示; k 为全流域综合的具有时间因次的储水系数; n 为单位线时段数, $n=T/\Delta\tau$; $\Delta\tau$ 为净雨、面积分配曲线及单位线的时段长(h); r 为面积分配曲线的时段数; T 为面积分配曲线的底长,即流域汇流时间。

由于该流域地下径流的比重不大,而且过程也比较稳定,因此地下径流的汇流计算采用简化三角形法^[15~18]。经过对历年雨洪资料分析,在汇流计算中采用的相关参数见表3。根据各时段地面径流演算及地下径流的计算结果相叠加,就可推求出降雨径流的洪水过程。

表3 红河流域汇流参数

Table 3 Parameters of concentration in the Honghe watershed

森林植被状况 Forest cover conditions	地面径流单位线(6h) Unit hydrograph of surface runoff				地下径流过程线(24h,10mm) Hydrograph of groundwater runoff		
	k	$\omega(\tau)_1$	$\omega(\tau)_2$	$\omega(\tau)_3$	峰现时间(d)	底长(d)	洪峰流量(m^3/s)
覆盖率 Cover ratio $\geq 60\%$ 蓄积量 Timber volume $\geq 5000\text{m}^3/\text{km}^2$	30	40%	30%	30%	5	14	$F/7 \times 8.64$
覆盖率 Cover ratio $< 60\%$ 蓄积量 Timber volume $< 5000\text{m}^3/\text{km}^2$	24	40%	60%	0	6	14	$F/7 \times 8.64$

3 模型检验

在模型中加入了森林植被影响指标以后,检验的主要目的看其是否达到了理想的精度;其次,在有可比性的条件下,检验计算结果是否能够反映出森林植被对降雨径流的影响作用。

3.1 精度检验

根据不同年代的森林植被指标以及确定的各种参数,对该流域的历年较大暴雨进行了产流、汇流计算(篇幅所限,计算过程从略),并将计算结果与实测结果列于表4、表5进行比较。

从表 4、表 5 看出,计算值与实测值基本是接近的,效果还是可以的。其中,产流计算精度较好,除 1977 年的一次暴雨外,精度一般都在 91% 以上,而汇流计算较产流计算的精度相对较低,洪峰流量的计算精度一般都在 85% 以上。误差较大的有 4 次降雨(分别为 1977 年 8 月、1964 年 7 月、1985 年 7 月、1985 年 8 月有一次),主要原因是由于原始资料在测验中漏掉洪峰所致。例如 1977 年 8 月 29~30 日的一次暴雨洪水,降雨量为 63.3 mm,径流量为 40.5mm,洪峰流量仅仅 100m³/s,与 1975 年 7 月 3~4 日的一次暴雨洪水相比较,该次降雨量为 65.5 mm,产流量为 16.5mm,而洪峰流量却是 137 m³/s,显然 1977 年 8 月 29~30 日的一次暴雨洪水漏测了洪峰。另外,还由于流域上从 20 世纪 80 年代修建了一处小型水库,对径流起到了一定的调节作用,导致洪峰流量实测值多次偏小。

表 4 历年较大降雨的径流量计算值与实测值比较

Table 4 Comparison between calculative values and observed values for runoff of larger storms over the years

年-月 Year-Month	森林植被状况 Forest vegetation conditions	降雨时间 Rain time (d. h)	降雨量 Rainfall (mm)	计算值 Calculation values (mm)	实测值 Observation values (mm)	精度 Accuracy(%)
1960-08	覆盖率 Cover ratio ≥ 60%	2.20 ~ 4.8	175.0	109.2	109.1	100
1964-07	蓄积量 Timber volume	22.00 ~ 22.21	79.9	53.9	50.0	92
1964-07	≥ 5000m ³ /km ²	29.17 ~ 30.2	52.2	42.3	43.2	98
1964-08		6.23 ~ 7.23	102.3	84.1	88.4	95
1971-08		31.17 ~ 1.14	117.2	97.4	102.7	95
1975-07	覆盖率 Cover ratio < 60%	3.14 ~ 4.11	65.5	17.2	16.5	96
1975-07	蓄积量 Timber volume	29.11 ~ 30.11	108.4	93.4	93.0	99
1975-07	< 5000m ³ /km ²	30.14 ~ 30.23	47.3	46.6	46.6	100
1977-08		3.00 ~ 3.23	63.3	58.4	40.5	56
1985-07		15.23 ~ 16.11	62.0	44.6	41.0	91
1985-07		25.00 ~ 25.24	70.6	54.3	49.6	91
1985-08		2.20 ~ 3.2	73.5	66.4	65.2	98
1985-08		4.11 ~ 7.14	116.8	111.1	112.1	99
1985-08		14.20 ~ 15.8	102.1	83.2	78.3	94
1985-08		18.14 ~ 19.23	79.6	71.3	72.3	99

表 5 历年较大洪水计算值与实测值比较

Table 5 Comparison between calculative and observed peak values of larger flood over the years

年-月 Year-month	汇流参数 Concentration parameters				降雨时间 Rain time (d. h)	计算峰值 Calculation peak (m ³ /s)	实测峰值 Observation peak (m ³ /s)	精度 Accuracy (%)
	k	$\omega(\tau)_1$ (%)	$\omega(\tau)_2$ (%)	$\omega(\tau)_3$ (%)				
1960-08	30	40	30	30	2.20 ~ 4.8	476	560	85
1960-06	30	40	30	30	8.80 ~ 9.2	490	465	93
1964-07	30	40	30	30	29.17 ~ 30.2	181	120	69
1964-08	30	40	30	30	6.23 ~ 7.23	360	355	99
1971-08	15	20	80	0	31.17 ~ 1.14	784	925	85
1975-07	24	40	60	0	3.14 ~ 4.11	132	137	96
1977-08	24	40	60	0	29.11 ~ 30.11	190	100	10
1985-07	24	40	60	0	15.23 ~ 16.11	275	205	66
1985-08	24	40	60	0	2.20 ~ 3.2	360	255	79
1985-08	24	40	60	0	4.11 ~ 7.14	485	470	97
1985-08	24	40	60	0	14.20 ~ 15.8	405	380	93
1985-08	24	40	60	0	18.14 ~ 19.23	416	370	88

3.2 森林植被影响降雨径流的模拟效果检验

从表 4 和表 5 的计算结果还可以大致看出森林植被的优劣对涵养水源、调节洪水作用的强弱。20 世纪 60 年代初比 70、80 年代的森林植被状况好,以此取几个典型暴雨事件的计算值,从两方面说明森林植被条件的不同对降雨径流作用的模拟效果。

(1)在涵养水源方面 1960 年 8 月 2~4 日的降雨量为 175.0 mm,产流量为 109.2 mm,而 1985 年 8 月 4~7 日的降雨量为 116.8 mm,产流量却为 111.1 mm,两次降雨量相差大,但产流量却基本相同;又如 1964 年 7 月 22 日的降雨量为 79.9 mm,产流量为 53.9 mm,而 1985 年 8 月 18~19 日的降雨量为 79.6 mm,产流量却为 71.3 mm,两次降雨量基本相同,产流量却相差较大。由此看出,森林植被减少了次洪量,减少量的一部分增加了地下深层储水量和河道枯季无雨期的径流。

(2)在调节洪水过程方面 1964 年 8 月 6~7 日的降雨量为 102.3 mm,产流量为 84.4 mm,洪峰流量为 $360\text{m}^3/\text{s}$,而 1985 年 8 月 14~15 日的降雨量为 102.1 mm,产流量为 83.2 mm,洪峰流量却为 $405\text{m}^3/\text{s}$,两次雨量和产流量基本相同,后者比前者洪峰流量增加了 13%;又如 1964 年 7 月 29~30 日的降雨量为 52.2 mm,产流量为 42.3 mm,洪峰流量为 $181\text{m}^3/\text{s}$,而 1985 年 7 月 15~16 日的降雨量为 62.0 mm,产流量为 44.6 mm,洪峰流量却为 $275\text{m}^3/\text{s}$,后者比前者的雨量增加 9.8 mm,产流量相差不大,仅增加了 2.3 mm,但洪峰流量却增加了 52%。

从以上两方面可初步看出,在模型中考虑了森林植被指标后,能够客观反映出“当森林植被状况不同时,流域的水文效应也是不同的”这一事实。

4 结果讨论

(1)通过雨洪资料的分析,结合湿润地区蓄满产流模型的使用经验以及参数确定方法,提出了以反映森林植被状况为特征的森林流域降雨径流模型,改进了以往在森林地区不考虑森林植被影响的降雨径流计算问题。同时,结合实测雨洪资料,进行了多次模拟计算和检验,通过比较,表明该模型不仅具有较好的精度,而且具有一定的合理性和适用性,能够较明显地反映出森林植被的不同而对降雨径流产生的影响作用也不同。

由于受到资料条件的限制,在模型结构及参数的选择上,尚有进一步改进、完善的余地。例如,在蒸散发计算时,可根据森林覆盖率和蓄积量区分蒸发能力;在产流计算上,再进一步考虑超渗地表产流和壤中流。另外,在考虑森林植被方面还是较粗略的,仅按森林覆盖率和蓄积量划分了两个档次进行参数的选取,如能再进一步细化将会是令人满意的,例如建立森林植被变化指标与模型参数之间的相关关系。虽然本模型尚有不足,但是这种有益尝试将能起到一定的借鉴作用,具有较好的发展和应用前景。

(2)理论上森林植被覆盖率变化范围为 0~100%,蓄积量为 0~ ∞ 。由于其它影响因素的干扰,当森林植被指标变化较小时,对降雨径流的影响作用并不敏感。为了避免其它因素的影响,特别是暴雨特性和人类活动的影响将森林的作用削弱或掩盖,划分森林植被指标时宜粗不宜细。如果除了森林植被条件以外,其它干扰因素相似或一致,那么可以肯定指标的划分越细越好,森林植被的影响作用也会明显地表现出来,而且完全能够建立起森林植被指标与模型参数之间的函数关系,但是在自然条件下,其它影响因素是不可控的,进行资料条件一致性的修正也是相当困难的。换言之,如果森林植被指标变幅大(例如,覆盖率在 0~100% 变化),则可以在模型中多划分几个档次(或等级),这样,即使不能建立森林指标与模型参数之间的定量关系,也能把它的影响作用揭示的更加充分、效果也会更加理想。然而,具有这种植被条件、又具备长期连续水文、森林植被动态监测资料的流域几乎没有。本文采用的森林覆盖率 $\geq 60\%$,而实际变化是在 60%~72%之间,森林植被覆盖率 $< 60\%$,而实际变化是在 42%~60%之间,变幅仅在 20%以内。因为相关关系不同于函数关系,如果在模型中体现森林植被动态的连续变化,一方面是困难的,另一方面也是不必要的,这是由于流域系统的复杂性所决定的。由于影响产汇流的因素较多,多种干扰因子交织在一起,往往会削弱甚至掩盖了森林的作用,表 4、表 5 中个别暴雨的计算结果显示了这一点,甚至出现了相反的情况。但是,这并不表明本文对森林植被的处理不当,更不能对森林植被的生态水文功能产生怀疑。

(3)在森林植被对降雨径流的影响中,主要体现在模型参数的选用上。对于两种不同的森林植被条件,蓄水容量 WM 的取值不同,影响了降雨开始时的土壤蓄水量大小,也间接地揭示了森林植被对土壤水分蒸散消耗和消长变化,加之流域蓄水容量-面积分配曲线特征参数 K 的取值不同,反映了产流量的大小,这几个参数综合在一起也间接地反映了森林植被对降雨的截留作用。另外,森林植被越好,稳定下渗率越大,地下径流量也就越多,揭示了森林植被增强了土壤渗透能力,体现了径流成份的比重。在流域汇流方面,流域的储水系数、汇流参数等都有所不同,在洪水过程线上就体现了洪峰流量的差别,计算结果已经初步揭示了森林植被涵养水源、调节洪水的功能。

Reference:

- [1] Li Z X, Zheng H, Ou Yang Z Y, *et al.* The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the Wolong Nature Reserve, *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5):1015—1021.
- [2] Yan J H, Zhou G Y, Zhang D Q, *et al.* Spatial and temporal variations of some hydrological factors in a climax forest ecosystem in the Dinghushan region. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11):2359—2366
- [3] Fan S X, Jiang D M, *et al.* Alamusa *et al* Studies on throughfall model in forest area. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7):1403—1407
- [4] Shi P L, Li W H. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481—487.
- [5] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X, *et al.* A study review for Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 79—84.
- [6] Liu S R, Sun P S, Wang J X, *et al.* Study on hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River, *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5):56—61.
- [7] Wang Q H, Li H E, Lu K F, *et al.* Analysis of affection of forest vegetation change on watershed runoff and flood. *Journal of Water Resources and Engineering*, 2004, 15(2):24—27.
- [8] He J Z, Li S B, Zhang Y J, *et al.* Analysis of the impacts of forest-cover variation on runoff Yield and concentration in watershed. *Journal of Hydrology*, 2000, 20(2):11—13.
- [9] Wang L X, Zhang Z Q. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dry areas. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 44—49.
- [10] Liu H F, Zhu Q K, Wei T X. Impact of forest vegetation on watershed runoff in the Loess areas of Western Shanxi Province. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(2):5—9.
- [11] Wei X H, Li W H, Zhou G Y, *et al.* Consistence and complexity of forests and runoff. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5):127—136.
- [12] Zhong X H, Li X M, Fan J R. Effect of function of forest vegetation change on flood and hazard reduction in upper area of the Yangtze River watershed. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3):3—7.
- [13] Wang Z Z. Discussion on control flood function of forest vegetation from especial flood in the Yangze river watershed. *Disaster reduction in China*, 1999, 9(1):21—24.
- [14] Wang M Y, Wang L X, An analysis of flood control in forest catchment of the area of Sanxia reservoir of west part of Hubei Province. *Resources and Environment of the Yangzi River Watershed*, 1995, 4(3):271—276.
- [15] Lin S Y. Hydrological forecast. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press of China, 2001. 102—103.
- [16] The Water Conservancy Committee of Yangtze River. Hydrological forecasting methods (edition 2th). Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press of China, 1993. 82—173.
- [17] Yuan Z X. Watershed hydrological models. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press of China, 1990. 32—73.
- [18] Zhan D J, Ye S Z. Engineering Hydrology. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press of China, 2000. 86—88.
- [19] Ri X F. Principle of hydrology. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press of China, 2004. 285—294.
- [20] Haan C T, Johnson H P, Brakensiek D L. Hydrologic modeling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers, 1982. 169—221.

参考文献:

- [1] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征. 生态学报, 2004, 24(5): 1015 ~ 1021.
- [2] 闫俊华, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律. 生态学报, 2003, 23(11): 2359 ~ 2366.
- [3] 范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 林内穿透雨量模型研究. 生态学报, 2003, 23(7): 1403 ~ 1407.
- [4] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481 ~ 487.
- [5] 张志强, 王礼先, 余新晓, 等. 森林植被影响径流形成机制研究进展. 自然资源学报, 2001, 16(1): 79 ~ 84.
- [6] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 56 ~ 61.
- [7] 王清华, 李怀恩, 卢科锋, 等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. 水资源与水工程学报, 2004, 15(2): 24 ~ 27.
- [8] 何进知, 李舒宝, 张永江, 等. 森林植被对流域产汇流影响效应分析. 水文, 2000, 20(2): 11 ~ 13.
- [9] 王礼先, 张志强. 干旱区森林对流域径流的影响. 自然资源学报, 2001, 16(5): 44 ~ 49.
- [10] 刘卉芳, 朱清科, 魏天兴. 晋西黄土区森林植被对流域径流的影响. 水土保持学报, 2004, 18(2): 5 ~ 9.
- [11] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 等. 森林与径流的一致性与复杂性. 自然资源学报, 2005, 20(5): 127 ~ 136.
- [12] 钟祥浩, 李祥妹, 范建容. 长江上游森林植被变化对削洪减灾功能的影响. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 3 ~ 7.
- [13] 王正周. 从长江流域的特大洪水谈森林植被的防洪功能. 中国减灾, 1999, 9(1): 21 ~ 24.
- [14] 王鸣远, 王礼先. 鄂西长江三峡库区森林集水区拦洪作用分析. 长江流域资源与环境, 1995, 4(3): 271 ~ 276.
- [15] 林三益. 水文预报. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. 102 ~ 103.
- [16] 长江水利委员会. 水文预报方法(第二版). 北京: 水利电力出版社, 1993. 82 ~ 173.
- [17] 袁作新. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1990. 32 ~ 73.
- [18] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 86 ~ 88.
- [19] 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 285 ~ 294.