

FCHM 结构与融雪模型^{*}

——森林流域水文模型研究之一

陈祖铭 任守贤

(成都科技大学 成都 610065)

编者按 森林水文效应和防护林水文效益的研究已越来越引起人们的重视。“七·五”期间,论文作者将水文学基本理论和流域水文模型模拟技术引入长江中上游防护林体系建设的研究中,取得了满意的成果,荣获中国科学院1992年度科学技术进步一等奖。近几年来,在进一步认识森林与水之间的交互作用的基础上,设计了一个“森林流域水文模型”,经10多条流域的水文模拟证明,模型在森林水文学、水文预报、水资源分析等方面是很有有效的。本刊从本期起分3期连续登载该模型的设计要点和计算实例。

提 要 为了研究森林水文效应,根据流域产汇流规律和森林与水分之间的交互作用,以系统分析理论为基础,研制了一个仅需“简单”输入的概念性的森林流域水文模型。高山深谷融雪模型是流域水文模型中的一个子模型,它是根据高山深谷地带积雪水当量和热力条件的垂直地带分布特性设计而成。本流域模型在10余个森林流域的水文模拟实验表明,模型是有效的,能够解决森林水文效应研究中的有关课题;并且,在洪水预报、水利水电工程、山地灾害研究与预测等领域,也有广泛的应用前景。

关键词 森林水文效应 流域水文模型 高山深谷 积雪水当量

我们在研究森林水文效应和预测防护林体系工程建设的的水文效益时,根据森林对水文各要素的干预特性和流域产、汇流理论,以系统分析为基础,建立了一个仅需“简单”输入矩阵的森林流域水文模型(Forest Catchment Hydrology Model 简称 FCHM),取得了预期的模拟效果,分别以“FCHM 结构与融雪模型”、“枝叶截蓄、流域蒸散发和界面水分效应”以及“模型参数确定与计算实例”为题,论述模型的设计要点、计算流程等,以利于模型的应用。

1 概 述

常言道:山青水秀,人杰地灵;穷山恶水,

地竭人贫。水和森林在人类进化、生存和繁衍过程中的重要地位,已为人类历史长河所印证。为了改善全球和地区的生态环境,世界上各种大规模的森林工程营造应运而生,一些国家和地区已从中获得了明显的生态效益、经济效益和社会效益。我国自1978年以来,先后规划和实施建设“三北防护林工程”、“太行山绿化工程”、“沿海防护林工程”、“长江中上游防护林体系工程”等^[1]。

实践证明,大规模森林体系工程建设对生态环境,削洪固沙等会带来显著的效益。对它们的水文效益必须尽快地作出正确的定量回答,森林流域水文模型 FCHM,正是这种背景下产生的,它不仅能够评价与预测森林水文效应,也可以解决水文预报、水资源分析

* 本课题系国家自然科学基金资助项目,水电部科研基金资助项目

等方面的实际问题。

众所周知,特定的森林生态环境或立地条件,造成独特的建群种、林型及其分布特点;相应地,森林又改造与维护着各环境因子。森林立地条件中水是最重要和最活跃的因子,换言之,森林对水的依赖程度特别大,因此,森林对水文因子的干扰作用也更显著。近40年来,人们对水和森林之间的交互作用进行了大量的研究,建立起许多的实验场、实验沟、实验小流域,采用对比法研究林区降雨径流过程中诸如枝叶截留、入渗、蒸散发等环节的水文物理过程^[2]。

微观尺度的小区对比实验与大中流域尺度的流域水文模型模拟相结合,才能在评价与预测大规模防护林体系的水文效益中收到事半功倍之效^[3]。这是因为:

1. 小区对比实验对揭示小水文循环中某些环节的微观尺度的水文物理过程,以及因子的独立贡献颇具功力;但是,由于实验小区与大中流域之间在森林环境、水文环境等方面有较大的差异,如果以此实验成果为依据去评价和预测大尺度的综合的森林水文效应,显然是欠妥的,甚至会得出相反的结论。当把小区实验所揭示的水文规律嵌入流域水文模型作水文模拟实验,便能快速地认识大区森林水文效应的物理机制。

2. 小区对比实验虽然起步较晚站点不多,但实验项目多内容丰富,与水文系统多站点长系列观测资料结合,可解评价与预测防护林体系工程水文效益的燃眉之急。

3. 防护林建设是一种坡地生物措施,它对径流成分的干预作用应当是重点研究内容。在目前条件下,采用流域水文模型作水文模拟试验,有助于认识森林在水源划分中的作用及其对径流与洪水特性的影响。

流域水文模型是以流域内从降水到径流全过程中,各种水文物理现象及其影响因素随时空的变化规律和相互间的作用为基础,辅以严密的逻辑推理和数学描述而构成的数

学模型^[4,5]。它与一般水文模型不同之处在于:它由体现水文物理规律的转换函数,描述流域特性或者代表水文物理量定义范围内的指标之模型参数,反映流域现时状况对面临时刻产汇流干预程度的状态变量所组成;特别注重各子系统和各因子对系统响应的组合贡献;对水文过程作连续模拟,而不是采用大时间尺度对某一水文事件作总量计算;流域原型输出是以率定参数和识别模型为校核目标,而不是反求转换函数的依据。以流域水文模型设计理论为基础,链入森林地区林冠层、枯枝落叶层、根系层等对水文规律的特殊作用,再顾及我国林区的资料条件,便构成了仅需“简单”测量方程的森林流域水文模型^[3]。

2 FCHM 结构

FCHM 包含着流域降水(主要是降雨和融雪),蒸散发、土壤水动态、河网总入流和河网汇流五个子系统,其中土壤水动态子系统是核心构件,流程图如图1所示。

根据流域内不同覆盖类型的产汇流条件,将对流域出流有贡献的面积分成不透水面积(IMP)与透水面积(PAR),并以各自的面积占流域面积的百分比表示。透水面积又分成森林地(FR)和非森林地($PAR - FR$)。水面面积和邻近河槽且径流能直接注入河网的表面不透水面积定义为不透水面积,剩余流域面积划归透水面积。

为了正确模拟森林对林床结构、土壤干湿化过程、土壤水分垂向分布、流域产汇流、水源组成等的作用,对各类面积设置垂向结构和相应的水分储存。不透水面积只有表面不透水结构,故无设置垂向分层结构与水分储存之必要。透水面积内的土层属于多孔介质,有吸水、蓄水和输水的功能,宛如一个“地下水库”。由于土壤的质地、组成、结构、比重、容重、孔隙度、厚度、地被物等决定土壤水理特性的因素,在流域内随时空变化,使得透水

面积各处“地下水库”的特点互不相同,水分再分配规律千差万别,直接影响流域的时空状态和出流特性。因此,对透水面积的描述、概括和土壤水动态的模拟是 FCHM 的重点。

非森林地透水面积沿垂向划分成表层、浅层和深层。表层指旱地作物区的耕作层或荒地的近地表生物活动层;浅层指表层之下的较密实的土层;在土层十分深厚的地区,入渗锋面能够达及的平均深度至浅层底面的土层,在土层浅薄地区,岩石风化层和基岩构造裂隙带定义为深层。森林地透水面积内的林床除沿垂向同样被划分成表层、浅层与深层

外,另增设林冠层(包括灌木层)。表层包含枯枝落叶层和有机质层;浅层指淋溶层,在一些地区还包含沉淀层的一部分甚至全部,无论是浅根性或深根性树种的绝大部分根系都汇集于浅层;深层与非森林地的深层类似。从理论上讲,沿垂向划分的层次越多越能仔细地描述垂向结构特征和土壤水动态过程,但事实上,分层不宜过多。从流域产流、水源划分、坡地汇流、流域出流过程可供识别的信息等角度观之,上述分层已能满足森林水文效应研究之需。

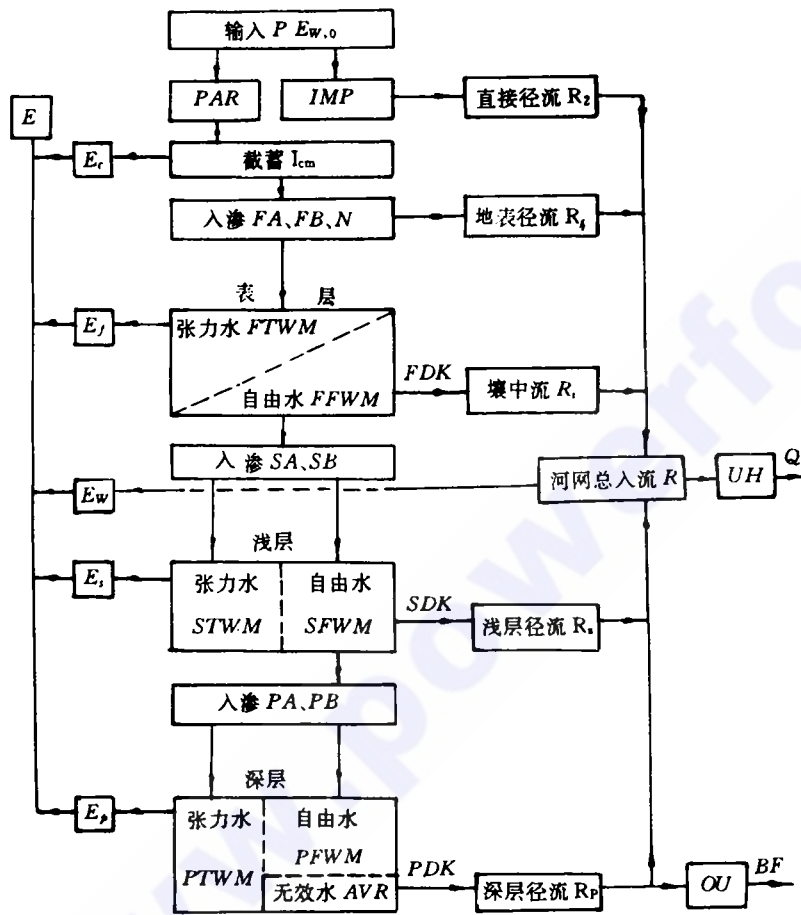


图1 FCHM流程图

林冠层设置林冠截蓄水量,表层、浅层和深层分别设置张力水与自由水储存,在深层自由水中还增设“蒸发无效水”储存与流域不闭

合量。同层的张力水与自由水之间按蓄量比(蓄量/容量)平衡原则向张力水单向传递水分,层间水分传递规律用入渗方程与饱和剩余

水反馈原理模拟。

模型参数及参变量说明如下： P ——降雨量(mm)； MP ——融雪出水量(mm)； IMP ——不透水面积百分比； E ——蒸散发量(mm)； R ——河网总入流(mm)； I_{cm} 、 I_c ——枝叶截蓄容量与蓄量(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 ——表层自由水日出流系数； 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 ——浅层自由水日出流系数； SA 、 AB ——浅层界面入渗参数； $PTWM$ 、 $PTWC$ ——深层张力水容量与蓄量(mm)； PA 、 PB ——深层界面入渗参数； PDK ——深层自由水日出流系数； REV ——蒸发无效水参数； OU ——流域不闭合参数。

不透水面积内的降水扣除雨期蒸发后成为河网入流 R_i 。非林地的降水扣除雨期蒸发和各层张力水吸水量后剩余部分成为地表径流和自由水。森林地的降水小部分耗于雨期蒸散发，部分被枝叶暂时截蓄，部分成为张力水，剩余部分成为地表径流和自由水。地表径流经坡面汇流注入河网成为河网入流 R_t ，各层自由水经一次线性水库调蓄后成为壤中流、浅层地下水和深层地下水的河网入流 R_s 、 R_r 和 R_b 。流域的河网总入流即为

$$R = (R_i + R_t + R_s + R_r)(1 - IMP) + R_b \cdot IMP$$

河网总入流经河网汇流抵达流域出流断面成为流域出流 Q 。各子模型的设计，计算流程及相互间的链接，将在后续各文章中论述。

3 高山深谷融雪模型

降水是 FCHM 最重要的输入变量，主要包含降雨和融雪出水量。我国林区，特别是四川主要林区大都位于江河上游的高山深谷地

带，或多或少都要涉及融雪出流问题^[6]。

已面世的具有代表性的融雪模型计有实测积雪量模型、水热平衡模型、空气动力学模型、气温日数模型等^[7]，在资料条件较好的平坦地区，计算大时间尺度的融雪总量效果尚可；在高山深谷地带作短时段连续融雪强度计算，以满足流域水文模型输入之需，未必奏效。因此，有必要设计一个适合高山深谷地带的融雪模型。

影响融雪出水强度及其过程的因素很多，但是对于一个特定的高山深谷地带而言，主要影响因素乃是积雪水当量和气候特性的垂直地带性分布规律。

积雪水当量主要与积雪面种 A ，积雪深度 H ，和积雪密度 ρ ，有关。积雪密度是积雪的重要物理性质，虽与很多因素有关，但与积雪深度的关系最密切。因此，可以用 $A \cdot H$ 表征积雪水当量。积雪量沿高程的分布取决于山体面积和积雪厚度随高程的变化。一般地讲，山体面积与高程之间的关系常成上凸状曲线形态，如图 2 中的 $A(h)$ 所示。图中 h 为海拔高程， h_0 为流域内积雪最低高程， h_m 为融雪区上限高程或永久雪线， A 为山体面积。根据 $A(h)$ 的特性，单位高差 Δh 所对应的山体面积 ΔA （或 $A(h)$ 对 h 的微分）随高程的变化成递减趋势，如图 2 中的 $\Delta A(h)$ 所示。高山深谷地带的气温具有十分明显的垂直地带性分布规律，降雪期间的水雪系数（降雪量 / 降水量）从山脚向山顶由小变大，积雪深度 H_s 随高程的升高而近似于线性递增规律，如图 2 中 $H_s(h)$ 所示。显然 $\Delta A(h)$ 与 $H_s(h)$ 之积可以描述山体积雪水当量沿高程的分布，如图 2 中的分布曲线 $\Delta A(h) \times H_s(h)$ 。

促成积雪融化最重要的因子是热力因素，而热力条件又取决于暖气团的活动与太阳辐射。一个特定的地区，暖气团的进退和太阳辐射能的多寡依四季轮回而变。在我国，入春以后热力条件日趋好转，高山深谷地带的融雪阈值气温从谷底逐渐向山顶转移，融雪面亦随之

抬升。即是说融雪面高程 h 与融雪历时 t 之间成正比关系,或曰同向变化,再考虑到单位正气温的融雪效应, $\Delta A(h) \times H_s(h)$ 分布曲线可以转换成如图3所示的 $C(t)$ 分布,并定义为“融雪分配函数”⁽³⁾。

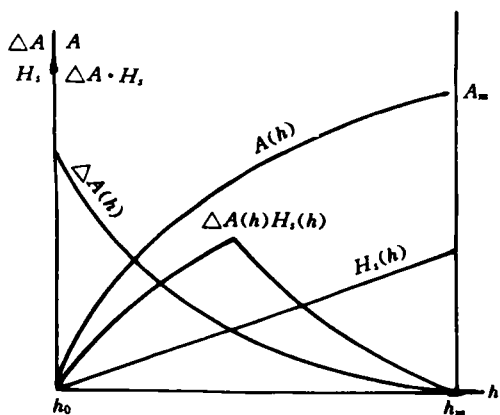


图2 面积、雪深和水当量分布图

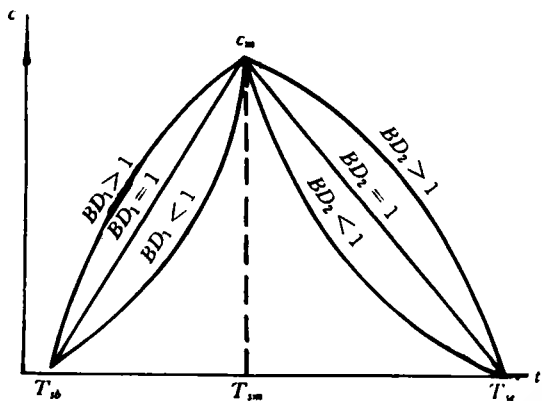


图3 融雪分配函数示意图

$C(t)$ 分布可以由抛物线方程来近似,即当 $T_b < t \leq T_m$ 时

$$C = C_m \left[1 - \left(1 - \frac{t - T_b}{T_m - T_b} \right)^{BD_1} \right]$$

当 $T_m < t < T_e$ 时

$$C = C_m \left[1 - \left(1 - \frac{T_e - t}{T_e - T_m} \right)^{BD_2} \right]$$

式中 t ——模拟时段; T_b, T_e ——融雪起止时段,取决于气候条件; T_m —— $C(t)$ 分布峰值出现时段,与山体面积和气候条件的垂直地带分布特点有关; C —— t 时段融雪分配系数;

C_m —— $C(t)$ 分配峰值,取决于融雪起始时流域积雪量 P_s ; BD ——方次。

各年的 P_s 不一样 C_m 也就不一样。十分遗憾,在我国高山深谷地带缺乏完整的积雪观测资料,可行的办法是根据个别水文气象站的观测资料和零星的调查记录,通过回归分析和模拟试验,建立“有效期”降水量 P_y 与 C_m 之间的关系,间接计算 C_m 。 C_m 表达式为

$$C_m = a + b \cdot P_y$$

式中 P_y ——有效期降水量(mm); a ——水与雪的地区差异参数(mm); b ——有效期与实际降雪期之间、水与雪密度之间的差异参数。

当计算流域逐时段融雪出水强度时,还必须考虑时段气温的作用。为此,在分配函数的基础上再链入正气温“热力过程” $T_a(t)$ 。于是,高山深谷融雪模型便为

当 $T_b > t > T_e$ 时

$$MP = 0$$

当 $T_b < t \leq T_m$ 时

$$MP = K \cdot T_a(t) \cdot (a + b \cdot P_y)$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{t - T_b}{T_m - T_b} \right)^{BD_1} \right] + A_m$$

当 $T_m < t < T_e$ 时

$$MP = K \cdot T_a(t) \cdot (a + b \cdot P_y)$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{T_e - t}{T_e - T_m} \right)^{BD_2} \right] + A_m$$

式中 MP ——时段融雪出流量(mm), K ——度·时段系数; A_m ——融雪气温阈值非零的融雪出水量校正值(mm)。

此融雪模型在岷江镇江关至紫坪铺区间、杂谷脑流域、黑水流域、涪江平武以上流域、西藏年楚河流域作了检验,均获得了满意的结果。有关模拟实例将在“模型参数确定与计算实例”一文中论及。(待续)

参考文献

- 1 李自刚等. 国内外防护林建设动态. 四川省林业厅编印, 1991年1月
- 2 中野秀章编, 李云森译. 森林水文学. 中国林业出版社, 1983年 (下转第96页)

(上接第15页)

- 3 陈祖铭、任守贤. 岷江上游森林水文效应研究. 地理学报, 1992年1月, 49~57
- 4 Chen Zuming and Ren Shouxian. Studies on the utility of Forest Hydrology Using a Catchment Model. IAHS. 1991. 345~358
- 5 陈祖铭、任守贤. 对 Sacramento 模型的研究. 成都科技大学学报, 1992年
- 6 四川植被协作组. 四川植被. 四川人民出版社, 1980年
- 7 李 琪译. 冰川覆盖地区和冰川流域的融水径流预报. 南京水文水资源研究所, 治淮委员会, 1987年9月

FCHM Structure And Snowmelt Model

Chen Zumin Ren Souxian

(Chengdu Science and Technology University)

Abstract In order to study forest hydrological effect, according to regulation of runoff yield and afflux and interaction effect between forest and moisture, and then based on the system analysis theory, the generalized forest drainage hydrological model which can be put in simply is developed. Snowmelt model for high mountain and deep valley is a submodel of drainage hydrological model. It is designed according to vertical zone distribution features of water equivalent for perpetual snow and thermal conditions in high mountain and deep valley. Over ten hydrological analog modeling experiments in forest drainage area show that the model is effective and capable of solving the relative problems in study on forest hydrological effects. In the future, it also can be widely used in the field of flood forecasting, water conservancy and water power projects, maintain disasters and forecasting.

Key Words forest hydrological effects, drainage hydrological model, high mountain and deep valley, water equivalent of perpetual snow.

本刊 1993 年增刊更正

页	行	误	正
3	倒 12	上交税金 5000 余万元	上交税金 500 多万元
12	8	水电产	水电厂
12	22	左岩	左岸
15	倒 12	灯泡贯流式机组	灯泡贯流式机组
17	12	最大功能	最大功率
25	7	供水管	供水环
31	24、28	δ_{ij}	σ_{ij}
33	16	BH	HB
86	表 2	1009	10090

特此更正,并向读者著者致歉!

(本刊编辑部)