

模型参数确定与计算实例*

——森林流域水文模型研究之三

陈祖铭 任守贤

(四川联合大学,成都,610065)

提 要 本文主要论述模型参数的初定、率定、检验以及模型计算实例。初定参数的主要依据材料是水文气象资料、自然地理资料、地形图等。以率定周期和检验周期的实测流量过程为校核目标,根据径流量、径流过程和洪水过程制定人-机对话调试方式下的目标函数,以确定性系数 D_r 为自动优化的目标函数,通过水文模拟率定和检验模型参数。本文中列出涪江平武以上流域的水文模拟,说明森林流域水文模型的计算步骤与可靠性,至于如何评价与预测森林水文效应,将另文专论。

关键词 模型参数 校核目标 目标函数

FCHM 主要由转换函数、模型参数和状态变量组成。转换函数体现水文规律,模型参数描述某流域的特征,状态变量反映流域现时态势及其对面临时刻产汇流的干预程度。当 FCHM 施用于某流域时,首要的任务便是确定模型参数。参数的确定分三步完成:初定、率定和检验。本文中主要论及初定参数的方法,顺便简述一下率定与检验方面的问题;另外,以涪江平武以上流域为例,论述 FCHM 的计算流程。

1 参数初定

为了将参数控制在一个有效的具有一定物理意义的范围内,减轻率定工作量,有必要给模型参数赋予初值。

1.1 K_e 与 I_m 的初定

流域蒸散发能力 E_p 反映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,通常是根据流域内某点或某几点的水面蒸发量 E_w 乘以折算系数 K_e 获得。 K_e 的初定与“水文预报”教材中的作法相同,

此不赘述。

选择前期十分干旱的特小洪水绘制成半对数流量过程线,如图 1 所示。本次降雨量只是在不透水面积上才产生径流过程 ABC 及其径流量 R ,故不透水面积参数 I_m 的初值为:

$$I_m = R/P \quad (1)$$

式中 P ——次降雨量(mm);为简化计,对自然流域也可初定 $I_m = 0.01$ 。

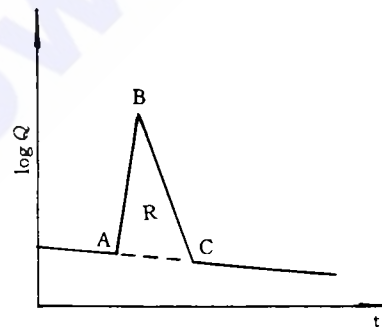


图 1 洪水半对数流量过程线

1.2 PDK 与 PFWM 的初定

选择前期十分干旱且峰后退水持续时间很长的大洪水过程,并绘制日平均流量半对数过程线,如图 2 所示。

* 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。

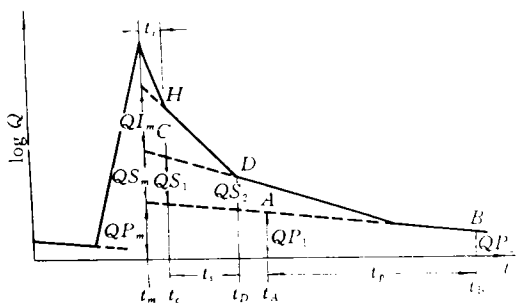


图2 半对数日平均流量过程线

由于退水方程为:

$$Q_t = Q_0 e^{-t/k}$$

显然, $\log Q \sim t$ 的退水段为折线, 每一段直线表示单一的或多种水源组合的退水规律。

向左延长深层地下水退水线, 在其上取 A、B 两点, 对应的流量分别为 QP_1 与 QP_2 , 相距日数 $t_p = t_B - t_A$, 则

$$e^{1/k_p} = (QP_2 / QP_1)^{1/t_p}$$

于是, 深层地下径流日出流系数和深层自由水容量的初值为:

$$PDK = 1 - (QP_2 / QP_1)^{1/t_p} \quad (2)$$

$$PFWM = QP_m / PDK \quad (3)$$

式中 K_p —— 深层自由水蓄泄系数;

QP_m —— 深层地下水洪峰流量

(mm/s 或 m^3/s)。

1.3 SDK 与 SFWM 的初定

在图2所示洪水过程的浅层地下水退水段上取 C、D 两点, 相应的浅层地下水流量为 QS_1 与 QS_2 , 相距日数 $t_s = t_D - t_C$ 。浅层地下径流日出流系数与自由水容量的初值为:

$$SDK = 1 - (QS_2 / QS_1)^{1/t_s} \quad (4)$$

$$SFWM = QS_m / SDK \quad (5)$$

式中 QS_m —— 浅层地下水洪峰流量 (m^3/s)。

1.4 FDK 与 FFWM 的初定

由于表层自由水受地表以上大气的干扰较大, 退水线不如浅层与深层地下水那样规整; 因此, 采用在壤中流退水末端选择一个 H 点, 使该点的壤中流流量等于壤中流洪峰流量 QI_m 的 1/10, 峰现时刻 t_m 至 H 点的时距

为 t_i 日的办法, 初定壤中流日出流系数与自由水容量即:

$$FDK = 1 - 0.1^{1/t_i} \quad (6)$$

$$FFWM = QI_m / FDK \quad (7)$$

1.5 FTWM 的初定

选择几次前期比较干旱的小降雨过程, 其量刚好达表层张力水容量而不产生径流。在此条件下即能初定 FTWM, 见表 1。

表 1

日期	降雨量(mm)	说明
19750520	17.3	有直接径流0.0984mm
19790430	29.5	有直接径流0.1678mm
19840912	30.8	有直接径流0.1752mm

初定 FTWM $\approx 30.0\text{mm}$

1.6 STWM 与 PTWM 的初定

选择前期十分干旱的长历时降雨的大洪水过程, 绘制成半对数日平均流量过程线, 如图3所示。

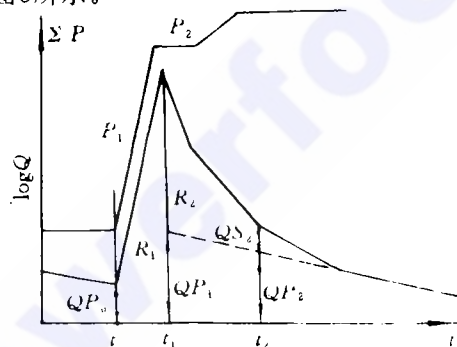


图3 半对数日平均流量过程线

图中

t_0 —— 雨起时刻;

t_1 —— 峰现时刻;

t_2 —— 壤中流结束时刻;

ΣP —— 次降雨累积量(mm);

P_1 —— t_0 至 t_1 时段内的降雨量(mm);

P_2 —— t_1 至 t_2 时段内的降雨量(mm);

R_1, R_2 —— 分别为 t_0 到 t_1 和 t_1 到 t_2 时段内的出流量(mm);

QP_0, QP_1, QP_2 —— t_0, t_1 和 t_2 时刻的深

层地下水出流量
(m^3/s);

QS_2 —— t_2 时刻浅层地下水出流量(m^3/s)。

t_1 到 t_2 时段内的流域水平衡式为:

$$P_2 + FTWC_1 + FFWC_1 + STWC_1 + SFWC_1 + PTWC_1 + PFWC_1 = R_2 + E_2 + FTWC_2 + FFWC_2 + STWC_2 + SFWC_2 + PTWC_2 + PFWC_2$$

当略去雨期蒸发量 E_2 后再考虑到 t_1 与 t_2 时刻的流域状态以及水分传递关系得:

$$PTWM = (P_2 + FFWC_1 + SFWC_1 - R_2 - QS_2/SDK)QP_m/(QP_2 - QP_1) - PFWC_1$$

根据图3和前面有关步骤的求值, 深层张力水容量 $PTWM$ 的初值可求。

同理, 由 t_0 到 t_1 时段内的水量平衡式求得求解 $STWM$ 初值的表达式为:

$$STWM = P_1 - R_1 - FTWM - FFWC_1 - SFWC_1 - (PTWM + PFWC_1)(QP_1 - QP_0)/QP_m$$

1.7 FA、FB、SA、SB、PA 与 PB 的初定

A、B 是入渗模型中的两个参数, 冠上 F、S、P 以区分地表, 浅层与深层界面入渗参数。

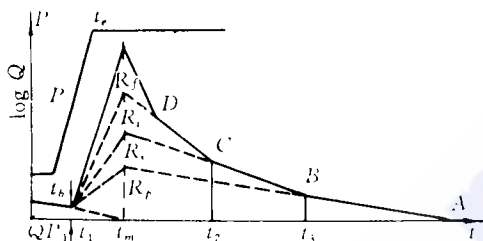


图4 半对数日平均流量过程线

1.7.1 各界面次降雨入渗量 选择几次前期十分干旱而且降雨强度大历时较长的洪水, 绘制半对数日平均流量过程线, 向左延长 AB、BC 和 CD 在峰现时刻 t_m 纵标上所得的交点与洪水起涨点相连, 初分出各种径流成分, 如图4所示。

图中:

t_b, t_e —— 雨起雨止时刻;

t_1 —— 洪水起涨时刻;

t_2, t_3 —— 壤中流与浅层地下径流终止时刻;

t_m —— 峰现时刻;

R_f —— 地表径流与直接径流(mm);

R_s —— 壤中流(mm);

R_i —— 浅层地下径流(mm);

R_p —— 深层地下径流(mm)。

当略去深层界面入渗阶段的深层蒸发量后, 深层界面入渗量 W_p 为:

$$W_p = R_p + (PTWM - PTWC_1)$$

考虑到同层张力水与自由水之间的传递关系, 上式改写成

$$W_p = R_p + PTWM(1 - PFWC_1/PFWC_1) \quad (10)$$

式中 $PFWC_1 = QP_1/PDK$

同理, 浅层界面入渗量 W_s 与地表界面入渗量 W_f 的计算式为:

$$W_s = R_s + W_p + STWM \quad (11)$$

$$W_f = R_f + W_s + FTWM \quad (12)$$

1.7.2 FA 与 FB 的初定 由菲利普

(Philip)入渗方程^[2]

$$f = a + b/\sqrt{t} \quad (13)$$

$$\text{得 } W = at + 2b\sqrt{t} \quad (14)$$

$$\text{与 } f = a + b^2(1 + \sqrt{1 + aWb^2})/W \quad (15)$$

式中 f —— 入渗强度;

W —— 入渗量;

t —— 入渗历时;

a, b —— 系数。

当上面三式用于地表界面时, 有 $W = W_f, t = t_e - t_b$ 。将所选几次洪水的 W_f 与 t 引入式(14), 计算并综合出 a, b 系数。然后, 假定一组 W_f , 利用式(15)计算对应的一组 f , 绘制如图5所示的 $f \sim W_f$ 关系或 $f \sim RAT$ 关系。

设菲利普入渗模型与 FCHM 中的入渗模型

$$f_f = f_{cf}(1 + FA \cdot RAT^{FB}) \text{ 在研究流域}$$

等效,即可应用上式去拟合图5中的 $f \sim W_f$ 关系,初定 FA 与 FB

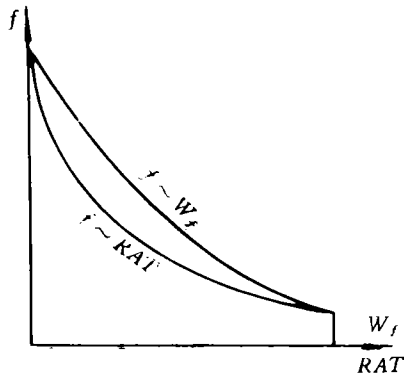


图5 $f_f \sim W_f$ 关系图

1.7.3 SA, SB, PA 与 PB 的初定 表层自由水是浅层界面入渗水流和壤中流之源,三者同起同落同有同无。显然,壤中流出流历时就是浅层界面入渗历时,即 $t = t_2 - t_1$,相应的入渗水量 $W = W_s$ 。同理,深层界面的入渗历时 $t = t_3 - t_1$,入渗水量 $W = W_p$ 。与初定 FA 和 FB 的步骤一样,即可初定 SA, SB, PA 和 PB 。

1.8 I_{cm}, N, REV 和 OU 的初定

枝叶截蓄容量 I_{cm} 、入渗强度分布曲线方次 N 、蒸发无效水参数 REV 和流域不闭合系数 OU ,通常是根据前人和模拟者积累的资料,经验地初定,或按取“极值”办法初定。

根据森林的树种、层次结构、林龄、郁闭度、蓄积量、季相等,在10~15mm 范围内初定 I_{cm} 。根据表层土壤特性、土层厚度、植被状况等在面上的分布特点,在0~0.5之间初定 N 值。 REV 的初值在0~0.4之间拟定。 OU 初值视流域的水文地质条件、面积大小与河槽切割深度而拟定,在情况不甚清楚的情况下,往往初定为零。

2 参数率定

将参数初值引入 FCHM,通过对率定周

期径流过程的连续模拟率定模型参数。凡比较灵敏和初值不易拟定的参数是率定的重点,例如 $Ke, FTWM, FFWM, FDK, FB$ 和 SB ,其次是 $N, SFWM$ 。

率定过程中,校核目标是流域实测流量过程,目标函数有:

2.1 径流总量目标函数

$$ROF = (SR - OR) / OR \quad (16)$$

式中 SR —— 率定周期或某年的计算径流量(mm); OR —— 同期实测径流量(mm)。

2.2 过程拟合目标函数

$$CRE = \frac{\sum_{t=1}^m |SQ(t) - OQ(t)|}{\sum_{t=1}^m SQ(t)} \quad (17)$$

式中: t —— 时间变量; m —— 时段数; $SQ(t)$ —— 率定周期或某年的逐时段计算流量(m^3/s); $OQ(t)$ —— 同期逐时段实测流量(m^3/s)。

2.3 洪水组合目标函数

洪水是率定周期中最敏感、时变剧烈和水源丰富的流域响应,是率定模型参数最重要的水文事件。由于洪水的校核目标包含洪峰流量、峰现时间和洪水过程,因此在 FCHM 中采用如下组合目标函数:

$$COF = PS^{1/x} \times TPF \times CRF \quad (18)$$

式中 x —— 为大于1.0的数,据计算目的和洪水特性由计算者自定; PS, TPF, CRF —— 洪峰流量、峰现时间和洪水过程的合格率,按国家有关规范计算^[3]。

在人-机对话调试方式下, ROF 与 CRE 趋近最小, COF 趋近最大后,再以“确定性系数” D_y 为目标函数,通过自动优化使 D_y 值满足国家有关规范要求时^[3],参数才被“优化”。

正确的模拟方法能使参数率定工作收到事半功倍之效。简言之,即从单一参数率定渐进到群体参数率定,依次考察各参数的单独作用与群体参数的组合贡献。根据笔者的经验,提出如下率定顺序供初次接触流域水文

模型者参考^[4]。

1. 在已确定的率定周期内选择一典型年,使全部参数特别是重点率定的参数尽可能都有登场的机会。

2. 模拟典型年的枯水段,借以率定深层参数 PDK 与 $PFWM$ 。

3. 在典型年中选择在退水阶段无降雨的大洪水,依次考察深层与浅层地下水组合退水段和地下水与壤中流组合退水段的模拟状况,顺次率定浅层与表层的参数。

4. 模拟洪峰段,着重率定地表界面参数。

5. 连续模拟典型年径流过程,考察拟合状况,注意参数组合贡献,适当调整有关参数。

6. 连续模拟率定周期的径流与洪水过程,使模型及其参数历经各态,微调后使参数逼近最优。

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 D_t 值既接近率定周期的 D_t 值,又要满足国家有关规范对 D_t 值的要求。特别指出,率定周期与检验周期绝对不能重叠。

3 计算实例

FCHM 已在川江地区、长江三峡地区、洞庭湖水系等30多个流域进行了鉴别和径流与洪水模拟,效果良好。为了节省篇幅,本文仅举涪江平武站以上流域的径流模拟为例,以见一斑。

3.1 流域概况

平武以上流域位于东经 $103^{\circ}20' \sim 104^{\circ}39'$, 北纬 $32^{\circ}13' \sim 33^{\circ}02'$, 控制面积 $4\ 310\text{km}^2$ 。

流域地处四川盆地向西北高原过渡的高山深谷地带,境内有岷山、龙门山和摩天岭,山岭绵延,峰峦重叠,河谷幽深,地势总趋势呈西北高东南低。流域又处于金汤弧东翼,北

有秦岭纬向构造带、东有龙门山北东向构造带、西有马尔康北西向构造带,历经晋宁—澄江—印支和喜马拉雅等多次运动,褶皱、断裂与构造裂隙发育,岩体破碎、松散^[5]。

降水形式主要是降雨、其次是降雪、间或有冰雹,多年平均降雨量 869.8mm , 降雪量为 230mm 左右;多年平均气温 10°C ;平武站多年平均水面蒸发量 796.7mm ;多年平均径流深 919.8mm , $3 \sim 7$ 月属雨雪混合补给, $8 \sim 10$ 月为降雨补给,其余各月为流域蓄水消退所致;洪水由暴雨造成,大洪水出现在 $6、7、8$ 三个月。

在这样的地形地貌和水热条件下,植被与土壤的形成与发育沿高程有明显的垂直地带性分布规律。森林主要分布在海拔 $3\ 000 \sim 3\ 700\text{m}$ 地带,建群种以冷杉为主,其次为桦树、栎类、马尾松等^[6],据1975年二类普查确定,森林覆盖率为 32% ,土壤属山地棕壤。农耕地很少,零星散布于涪江河谷阶地。

3.2 参数确定与径流模拟

3.2.1 参数初定 根据流域的自然地理资料,水文气象资料、实验资料、地形图,按照节一的办法,初定模型参数,其值见表2所列。

表 2 平武站以上模型参数表

参数名	参数值		参数名	参数值	
	初值	优化值		初值	优化值
FTWM	30	34	SB	3.50	3.60
FFWM	70	73	PTWM	50	60
FDK	0.15	0.20	PFWM	260	280
FA	20	21.0	PDK	0.004	0.004
FB	1.0	1.40	PA	20.0	20.0
N	0.30	0.20	PB	2.00	2.00
STWM	50	54	REV	0.40	0.30
SFWM	155	160	I_m	0.01	0.002
SDK	0.04	0.05	K_r	0.18	0.20
SA	35.0	35.0	OU	0.00	0.00

表 3 率定与检验成果表

项目	ROF	CRF	COF	PS	TPF	CRF	D_t
率定	-0.20	0.19	0.69	0.92	0.89	0.81	0.903
检验	-0.21	0.18	0.71	0.91	0.90	0.83	0.910

3.2.2 参数率定 根据评价森林水文效应之需和流域的水文特性,选择1975、1976、1977和1978四年为率定周期。一般情况下,

FCHM 的输入变量只包含逐时段的降雨量、水面蒸发量和流量。由于本流域有积雪及其融雪出流,故增加逐日气温和有效期降水量两个输入变量。将参数初值引入率定周期,通过模拟实验,使各目标函数趋近极值而获得优化值,见表 2 和表 3 所列。

在参数率定过程中,除遵循本文节二中所指出的规则外,对以下四个参数的率定,有必要作一些简要的补充。

1. 在融雪期, K_s 取值偏大,蒸散发量偏大。为使径流模拟成果达优,必然增大融雪出水量,歪曲了系统分析。鉴于此,只能选用非融雪期作为率定对象,率定 K_s 。

2. 对于一场大雨过程, I_m 与 $FTWM$ 取值偏大偏小都不会造成可视误差。所以,前期十分干旱的小降雨过程才是率定 I_m 与 $FTWM$ 的依据。

3. 一个流域是否闭合,以及不闭合程度有多大,除有准确的水文地质资料证明外,均无法确认,即是说参数 OU 很难预先拟定。根据观测实验与模拟实验表明,在浅层与深层自由水参数以及汛期模拟径流过程趋近最优

的条件下,退水段模拟径流半对数过程与实测径流半对数过程相互平行但不重合时,必然是流域不闭合所致。调整 OU 使两者基本重合,则对应的 OU 值即为优化值^[7]。

3.3 参数检验

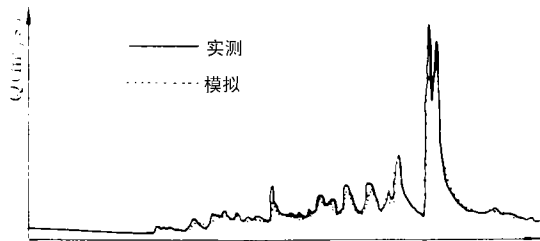


图 6 平武站 1978 年日流量过程线

考虑到本流域森林砍伐强度较大给模型参数带来的时变影响,在率定周期附近选择 1979、1980、1981 和 1982 四年作为检验周期,检验结果见表 3。检验周期与率定周期的 D_r 值十分接近且均大于 0.90,模拟的有效性属甲等,模型及其参数可以用于本流域的森林水文效应研究、水文预报和其它目标的水文计算。

表 4 平武站 1978 年模拟成果统计表

单位: mm

月	P	MP	$E_{w,0}$	E	R_z	R_l	R_s	R_a	R_p	模拟 R	实测 R
1	1.5		41.0	8.2					27.4	27.4	27.1
2	16.7		36.0	7.2					22.0	22.0	21.7
3	63.4	21.7	45.5	9.1	0.1			5.2	22.9	28.2	26.9
4	47.8	35.8	88.5	17.7	0.1			8.3	26.4	34.8	38.0
5	124.9	16.1	98.0	19.6	0.2	0.1	0.8	22.5	32.2	55.9	60.0
6	117.8	8.3	94.5	18.9	0.2	0.1	0.8	60.1	33.5	94.7	91.3
7	196.8	3.0	87.0	17.4	0.4	0.4	10.5	102.8	34.7	148.7	139.9
8	166.1		74.5	14.9	0.3	0.4	7.9	100.4	34.7	143.7	131.7
9	250.9		50.5	10.1	0.5	6.6	86.8	148.2	33.5	275.6	278.4
10	65.5		41.5	8.3	0.1			58.4	34.7	93.2	94.1
11	30.7		22.0	4.4	0.1			14.0	33.4	47.5	47.3
12	0.2		27.0	5.4				0.3	32.1	32.4	33.6
全年	1081.4	85.0	706.0	141.2	2.2	7.6	106.8	520.2	367.8	1004.2	990.0

4 水文模拟

可以认为,优化后的模型参数能够充分

描述流域的自然地理特性及其对产汇流与流域响应的作用。此时,只要输入模拟周期逐时段的降雨量、水面蒸发量、逐日气温和有效期降水量,即可计算出对应的流量过程,达成计

算目的。为了节省篇幅,在表4与图6中只展示1978年的模拟成果。

水文效应,以及四川主要林区的森林水文效应规律,将另文论述。(全文完)

5 结 语

根据已揭示的水文物理规律,设计FCHM的模型结构与计算流程,各模型参数具有一定的物理含义,主要参数灵敏度高且具备较大的伸缩性。FCHM采用分层界面水分效应模拟产流规律和水源划分,在坡地范围内,充分考虑到森林与水分之间的交互作用,因此本模型不仅可以评价和预测森林水文效应,也是水文预报和其它目标水文计算的有效工具。FCHM是确定性概念性流域水文模型,在水量级和时轴上可以外延使用。

至于如何用FCHM去评价与预测森林

参 考 文 献

- 1 长委会. 水文预报方法. 水利出版社, 1979年2月
- 2 Philip, J. R. The Theory of infiltration, *Adv. Hydro-science* Vol. 5, 1969
- 3 中华人民共和国水利电力部标准: “水文情报预报规范”SD 138-85, 1985
- 4 陈祖铭、任守贤. 流域水文模型. 成都科技大学, 1991年2月
- 5 四川省测绘局、四川省地图集. 四川省测绘局出版, 1981
- 6 四川植被协作组、四川植被. 四川人民出版社, 1980年
- 7 Eugenc L. Peck, Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River forecast System. office of Hydrology, NOAA, June, 1976, 14-23.

(收稿日期: 19940126)

Determination of Model Parameters and Examples of Computation ——Study on Hydrology Models of Forest Basin (II)

Chen Zuming Ren Shouxian
(Sichuan United University)

Abstract Preliminary determination, calibration, check of model parameters and model computation examples are mainly described. Preliminarily determined parameters are mainly based on hydrological and meteorologic data, natural geographical data and topographic map. The measured discharge hydrograph in calibration period and check period is the objective of check. Objective function under man-machine interactive debugging gained from runoff, runoff process, and flood process. Deterministic parameter D_1 is defined as automatically optimized objective function, therefore, model parameters can be calibrated and checked by hydrological analogue. Hydrological analogue in the basin at upstream of Pingwu along the Fu River is shown to demonstrate the computation steps and reliability of hydrological models in forest basin, the assessment and forecast of forest hydrology effect will be stated in another paper.

Key Words model parameter, check objective, objective function.

(上接第28页)

Research on Development of Power Stations in Cascade on Main Jinsha River and Historical Review of Preparing Works before Construction at Xiluodu Projects Prospect

Tao Sangu
(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract Abundant water resources of main Jinsha River and favourable conditions for building Xiluodu Waterpower Station are briefly described here. The historical review of research on development of power stations in cascade during 45 years, the difficulties in preparing works before construction at Xiluodu project and activities for promoting the project by men of insight in China in recent years are introduced. The historical records are provided for men who will construct Xiluodu Waterpower Station.

Key Words Jinsha River, develop in cascade, Xiluodu Waterpower Project, preparing works before construction, historical review, prospect.