

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2010. 03. 002

三参数月水量平衡模型在丹江口水库控制流域的应用

冯小冲 王银堂 胡庆芳

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:基于水热平衡方程和流域蓄泄关系,建立了流域三参数月水量平衡模型,该模型概化了径流、降雨、蒸发和流域蓄水量之间的关系,并根据分区域汇流特点计算月径流量。利用该模型对丹江口上游 7 个子流域及全流域 1977—1987 年的月径流过程进行模拟和检验,率定期和检验期的确定性系数分别为 0.85 和 0.80,径流总量相对误差分别为 0.7% 和 0.2%。模拟和检验结果表明,所建模型具有较强的适用性,能较好地模拟丹江口水库控制流域及其各子流域的月径流过程,为建立丹江口水库月径流预报模型提供了可靠的技术途径。

关键词:月水量平衡模型;丹江口水库;径流模拟

中图分类号:TV697. P33 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)03-0005-03

Application of three-parameter monthly water balance model in Danjiangkou Reservoir Basin//FENG Xiao-chong, WANG Yin-tang, HU Qing-fang(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : A three-parameter monthly water balance model for a river basin was established. The proposed model was based on the hydrothermal equilibrium equation and the relationship between water storage and discharge of the basin and generalized the relationship among runoff, rainfall, evaporation and storage capacity. The monthly runoff was calculated according to the features of sub-basin concentration of flows. The model was employed to simulate and validate the runoff process of 7 sub-basins upstream of Danjiangkou Reservoir and the whole basin from 1977 to 1987. The value of deterministic coefficient D_C of the whole basin was 0.85 for the calibration period and 0.80 for the validation period. The value of relative error of the total runoff was 0.7% for the calibration period and 0.2% for the validation period. The results show that the present three-parameter monthly balance model is feasible in the simulation of the runoff process of the whole basin and different sub-basin of Danjiangkou Reservoir. It provides a reliable technical approach for the establishment of Danjiangkou Reservoir monthly runoff forecast model.

Key words : monthly water balance model ; Danjiangkou Reservoir ; runoff simulation

流域月水量平衡模型是一种以水量平衡原理为基础的概念性水文模型,其以降水、温度等气象因子作为输入,将各水文要素之间的关系概化成相对简单的数学关系方程来模拟流域水文过程^[1]。该模型的结构简单,参数少,对资料要求不高,因而在水资源分析与评价等方面得到广泛应用。

自 Thornthwaite 于 1948 年提出第 1 个水量平衡模型以来,国内外的水量平衡模型已达数十种,其中比较著名的有 abcd 模型^[1]、澳大利亚模型^[2]、比利时模型^[1]、两参数水量平衡模型^[3]、分布式时变增益模型^[4]等。在最近几年里 Zhang 等^[5]、王渺林等^[6]基于 Budyko 假设对澳大利亚的 265 个流域建立了不同时间尺度的水量平衡模型,进行了比较深入的分析研

究,进一步提升了水量平衡的理论和应用水平。

笔者建立了 1 个三参数月水量平衡模型,利用流域降水和气象资料,对丹江口水库控制流域径流过程进行模拟,并对该模型的适应性进行了评估,为分析水库控制流域水文变量的动态变化、建立水库月径流预报模型提供了技术途径和方案。

1 三参数月水量平衡模型的建立

三参数月水量平衡模型的基本原理简述如下。首先,由水量平衡原理^[7]得到土壤蓄水量时段变化方程:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t \tag{1}$$

式中: P_t 、 E_t 、 Q_t 分别为第 t 月的降水、蒸散发和径流量; S_t 、 S_{t-1} 分别为第 t 月末和第 $t-1$ 月末的土壤蓄水量。

对于流域实际蒸散发,将流域降水量和前期蓄水量作为影响因子,即

$$E_t = CE_{0t}f(S_{t-1}, P_t, E_{0t}) \quad (2)$$

式中: E_{0t} 为流域的蒸散发能力; C 为常数,是模型的第1个参数,表示流域蒸散发能力与流域实际蒸散发的折算系数; f 为表示流域蓄水量和降水对蒸散发的胁迫作用的函数,如果流域供水充分则 f 值为1,否则 f 介于0和1之间。 f 既可以采用双曲正切函数来表达,也可以采用其他函数来表达。

仿照 Ol'dekop 公式,笔者构造了指数形式的水热平衡公式计算流域实际蒸散发:

$$E_t = CE_{0t} \frac{\exp\left(\frac{bS_{t-1} + P_t}{E_{0t}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{bS_{t-1} + P_t}{E_{0t}}\right) + 1} \quad (3)$$

式中: $bS_{t-1} + P_t$ 为流域可供蒸散的水量; b 为模型的第2个参数,系前期土壤蓄水量可供流域蒸散发的比例, $b \in (0, 1]$ 。

式(3)描述了流域前期蓄水量(土壤蓄水量、地表蓄水量)和降水对蒸散发的贡献。根据式(3),在雨季流域蒸散发可以达到或接近蒸散发能力,同时在旱季又不会出现蒸散发过小或为零的现象,这样所模拟的流域径流和蓄水量动态变化过程会更合理。

流域月径流过程假定为非线性水库流出:

$$Q_t = S_t^* \tanh\left(\frac{S_t^*}{S_C}\right) \quad (4)$$

其中

$$S_t^* = S_{t-1} + P_t - E_t$$

式中: S_t^* 为流域前期蓄水量与本月净雨量之和; S_C 为模型的第3个参数,是流域径流与蓄水量之间的关系参数。

根据相关研究^[1],当 S_t^*/S_C 较小时,用直线 $y = 0.925x$ 近似双曲正切函数 $y = \tanh x$ 效果较好。因此可以将式(4)简化成二次函数:

$$Q_t = \frac{0.925 S_t^{*2}}{S_C} \quad (5)$$

式(5)实际上是流域蓄泄关系的一种特殊形式^[8]。

2 丹江口水库月径流过程的模拟

2.1 研究区域概况

研究实例为丹江口水库控制流域,地理位置处于东经 $106^{\circ}12' \sim 111^{\circ}26'$ 、北纬 $31^{\circ}24' \sim 34^{\circ}11'$ 之间。控制流域面积为 $95\,217\text{ km}^2$,占汉江流域集水面积的60%。流域年平均蒸发量为 $900 \sim 1\,500\text{ mm}$,多年平均降雨量约 $700 \sim 1\,100\text{ mm}$ 。流域多年平均径流量为 393.4 亿 m^3 ,年内分配不均匀,一般7—10月占全年

径流量的65%左右。

本研究收集了丹江口流域8个主要水文站、258个雨量站、11个气象站1977—1987年的月径流、降水量和气象数据,同时对部分缺测数据进行了插补,并对实测径流序列进行了必要的还原。蒸发能力数据由 Penman-Montieth 公式^[9-12]计算的参考作物腾发量代表,相关数据来源为中国气象科学数据共享网。

2.2 流域分区

丹江口流域面积高达近 10 万 km^2 ,若直接对整个流域进行模拟,则可能无法充分反映流域水文气象特征的空间变异性。因此,对丹江口流域进行分区模拟并考虑分区后流域汇流过程的差异。

对丹江口流域进行分区,根据有关水文站点的分布情况,合理地反映丹江口流域的水系特征和水文气候特征的空间变化,可将全流域划分为7个分区,其分布范围和基本特征如表1和图1所示。同时考虑各子流域的汇流过程,将考虑汇流演算后的分区流量进行叠加,得到丹江口水库入库径流模拟结果。本文采用的汇流演算方案为

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{i=7} [Q_i(t)K_i + Q_i(t-1)(1-K_i)] \quad (6)$$

式中: K_i 为分区 i 的径流消退系数,反映径流在前后2个月之间的分配。

表1 丹江口水库控制流域子流域特征

分区	范围	面积/ km^2	控制站
1	石泉站以上	23 805	石 泉
2	石泉和安康水库区间	17 634	安康水库
3	安康水库和白河站区间	17 676	白 河
4	黄龙滩以上堵河流域	10 668	黄龙港
5	西峡站控制流域	3 418	西 峡
6	荆紫关站控制流域	7 060	荆紫关
7	分区1~6以外的部分	14 956	

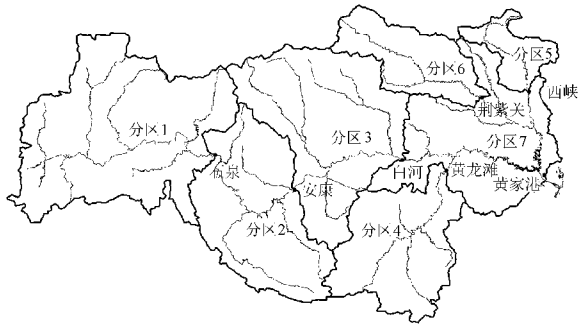


图1 丹江口水库控制流域子流域划分

2.3 模型的精度评定

模型的精度评定采用径流总量得相对误差和径流过程的不确定性系数来评定。

$$R = \frac{F - F_0}{F_0} \quad (7)$$

$$D_C = 1 - \frac{\sum_t (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_t (Q_t - \bar{Q}_c)^2} \quad (8)$$

式中： R 为径流总量相对误差； F 和 F_0 分别为模拟径流总量和实测径流总量； D_C 为月径流量过程确定性系数； $\hat{Q}_t$ 为第 t 月的模拟径流量； $\bar{Q}_c$ 为模型率定期和检验期实测月径流量的均值。

2.4 模拟结果分析

本研究分析采用 1977—1984 年作为率定期，1985—1987 年作为检验期。用所建模型对丹江口水库控制流域的各子流域及全流域进行模拟，流域的模型参数以及模拟结果见表 2 及图 2~5。分析表 2 及图 2~5 可以得到以下结论：

表 2 各流域的模型参数和模拟结果

流域	参数值			率定期		检验期	
	C	b	S_C	D_C	$R/\%$	D_C	$R/\%$
石泉	2.20	0.22	1451	0.849	5	0.736	-6
石泉—安康	2.99	0.39	1400	0.724	-1	0.746	10
安康—白河	2.99	0.32	1426	0.702	5	0.714	-3
黄龙滩	1.94	0.30	900	0.732	-2	0.678	-1
荆紫关	2.99	0.25	956	0.859	4	0.881	-9
西峡	2.98	0.32	923	0.815	0	0.795	9
剩余区间	2.74	0.28	1316	0.712	-6	0.708	9
全流域				0.850	0.7	0.800	0.2

a. 所建立的水量平衡模型在各分区的模拟精度较高。从表 2 及图 2~5 可以看出，对于流域不同分区，模型均能够较好地模拟月径流量过程，模拟与实测的峰值对应关系也较好。在率定期和检验期，各流域的确定性系数 D_C 除黄龙滩区间检验期外都大于 0.7。径流总量相对误差值普遍较小，各流域都控制在 10% 以内，能够基本满足水量平衡。由于受石泉、安康等水库以及人类活动的影响，石泉—安康区间、安康—白河区间、黄龙滩区间以及其他剩余区间结果精度略差。

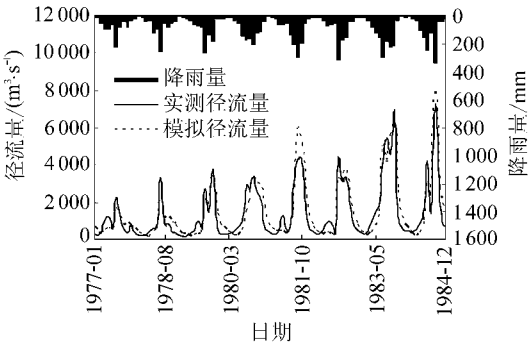


图 2 全流域率定期模拟与实测月径流过程

b. 表 3 为石泉子流域 $S_C = 1451$ 及 $b = 0.22$ 时率定期及检验期的模型精度随 C 值的变化情况。在模型的 3 个参数敏感性分析中， C 值最为敏感， S_C 和 b 次之。 C 直接影响到流域蒸散发的大小，从

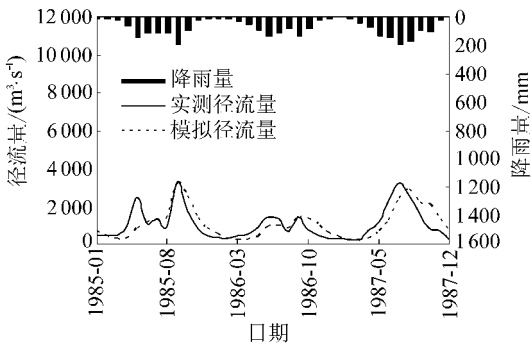


图 3 全流域检验期模拟与实测月径流过程

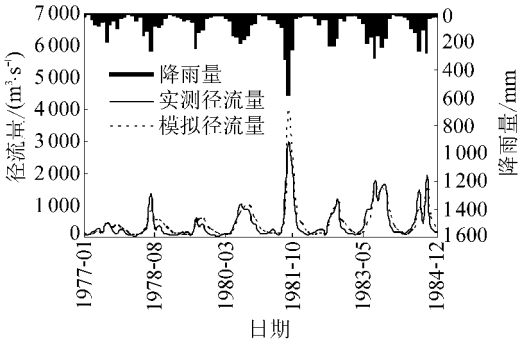


图 4 石泉控制站率定期模拟与实测月径流过程

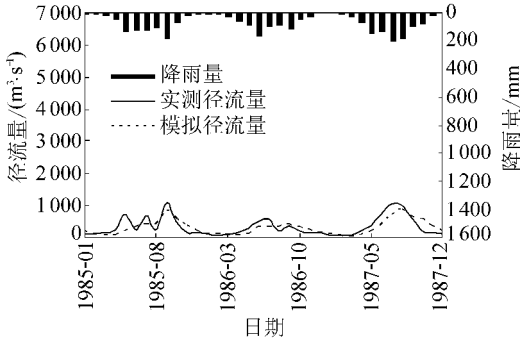


图 5 石泉控制站检验期模拟与实测月径流过程而也影响到月径流过程模拟的精确性。 S_C 是一个反映流域蓄泄关系的综合参数，反映了气候特征、植被覆盖、地质条件等一系列因素对流域蓄泄过程的共同影响。

表 3 石泉流域模型参数 C 的敏感性分析

C	率定期		检验期	
	D_C	$R/\%$	D_C	$R/\%$
1.6	0.812	24	0.752	16
1.8	0.832	18	0.760	8
2.0	0.844	11	0.755	1
2.2	0.849	5	0.736	-6
2.4	0.846	-1	0.704	-13
2.6	0.836	-8	0.660	-20
2.8	0.820	-14	0.604	-27

c. 模型在丹江口全流域达到了较好的模拟精度。在率定期和检验期 D_C 都达到了 0.8 以上， R 在率定期为 0.7%、检验期为 0.2%。模拟与实测的峰值对应关系也较好，峰形过程比较接近于实测过程。

(下转第 11 页)

3 结 论

- a. 水流沿排沙管流至水力旋喷管 ,产生动量矩 T 和角速度 ω ,由能量方程及动量矩方程计算得到自清洗装置旋喷管角速度的计算式为 $\omega = Q_p / (2A_p r_2)$ 旋转圈数的计算式为 $n = 15 Q_p / (\pi A_p r_2)$,吸附力的计算式为 $F = Q_p^2 \rho / (32 A_x)$ 。
- b. 由自清洗装置旋喷管角速度的计算式可知 ,旋喷管角速度与流量及旋喷管出口面积有关。当流量一定时 ,减小旋喷管出口面积 ,旋喷管转速会增大 ,从而扫遍网面的次数增多 ,滤网冲净率也就相应提高。但由动力学可知 ,当出口面积小到某一值 ,即转速达到某一值时 ,排污装置将无法完成吸污过程 ,反而会降低冲净率。因此 ,出口面积应控制在一定范围内来保证冲净率。
- c. 由于存在沙粒堵孔现象 ,因此只有排污装置产生的吸附力远大于泥沙总黏结力时才能彻底完成自清洗。泥沙细颗粒之间的黏结力一般采用经验公式 $F' = \eta D$ 计算。
- d. 将试验基本参数代入吸附力及泥沙黏结力计算式可知 ,试验用过滤器吸沙组件产生的吸附力远大于泥沙总黏结力 ,满足自清洗要求。即自吸自动网式过滤器作为一种新型过滤设备其清洗方式可以大幅度提高清洗效率。

(上接第 7 页)

3 结 语

建立了丹江口控制流域三参数月水量平衡模型 利用此模型对丹江口流域 7 个子流域及全流域的径流过程进行模拟和检验。结果表明 ,此模型具有结构简单、物理概念清楚、模拟精度高、适用性较强等特点 ,可为水库月径流的预测提供技术途径。

参考文献 :

[1] 胡庆芳 ,王银堂 ,刘克琳 ,等 .基于改进的两参数月水量平衡模型的月径流模拟[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35(6) :638-642.

[2] 熊立华 ,郭生练 .分布式流域水文模型[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2004 :105-119.

[3] 熊立华 ,郭生练 ,王渺林 ,等 .两参数月水量平衡模型的研制及应用[J]. 水科学进展 ,1996 ,7(增刊) :80-86.

[4] 王纲胜 ,夏军 ,万东晖 ,等 .气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J]. 自然资源学报 ,2006 ,21(1) :86-91.

[5] ZHANG Lu ,POTTER N ,HICKEL K ,et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko Framework-Model development and testing[J]. Journal of

e. 每个吸沙组件开口的吸附力大小决定了排污运行时间及冲净率。根据这个定量值 ,可以对排污时间及自清洗装置进行优化 ,从而使过滤器过滤及排污达到最优效果 ,对后续工作具有一定的理论指导意义。

参考文献 :

[1] 李代鑫 .我国节水灌溉的现状 & 展望[EB/OL].[2006-05-31]. http ://www.cnhydro.com.

[2] 许志方 ,董文楚 .论我国喷微灌发展前景和实施建议[J]. 节水灌溉 ,2004(3) :1-4.

[3] 山伦 ,康绍忠 ,吴普特 .中国节水农业[M]. 北京 :中国农业出版社 ,2004.

[4] ANON. Self cleaning water filter[J]. Process Engineering , 1984 ,2(1) :27-29.

[5] 钱宁 ,万兆惠 .泥沙运动力学[M]. 北京 :科学出版社 ,1991.

[6] DORJAGUIN B V ,VOROPAYEVA T N. Surface forces and the stability of colloids and disperse systems[J]. Colloid Science , 1964 ,19(2) :113-135.

[7] 唐存本 .泥沙起动的规律[J]. 水利学报 ,1963(2) :1-12.

[8] 丁启圣 ,王维一 .新型实用过滤技术[M]. 北京 :冶金工业出版社 ,2000.

[9] 张国祥 ,崔永顺 .砂粒堵孔试验[J]. 节水灌溉 ,1993(1) :53-55.

(收稿日期 2009-09-15 编辑 骆超)

Hydrology 2008 ,360 :117-131.

[6] 王渺林 ,郭生练 .月水量平衡模型比较分析及其应用[J]. 人民长江 ,2000 ,31(6) :32-33.

[7] 詹道江 ,叶守泽 .工程水文学[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2002 :72-107.

[8] 芮孝芳 .水文学原理[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2004 :249-312.

[9] 史海滨 ,何京丽 ,郭克贞 ,等 .参考作物腾发量计算方法及其适用性评价[J]. 灌溉排水 ,1997 ,16(2) :50-54.

[10] 胡庆芳 .参考腾发量的计算和预测方法研究[D]. 北京 :清华大学 ,2005.

[11] 蔡甲冰 ,刘钰 ,雷廷武 ,等 .根据天气预报估算参照腾发量[J]. 农业工程学报 ,2005 ,21(11) :11-15.

[12] 杨汉波 .流域水热耦合平衡方程推导及其应用[D]. 北京 :清华大学 ,2008.

(收稿日期 2009-06-30 编辑 高建群)

