

文章编号:0559-9350(2011)07-0848-09

基于WEP模型和TRMM_PR的唐家山堰塞湖入湖径流预报

赵志轩^{1,2}, 严登华², 王浩², 贾仰文²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 为解决缺资料地区的堰塞湖入湖径流模拟预报问题, 本文以2008年5月12汶川大地震形成的唐家山堰塞湖为研究对象; 采用分布式水文模型与热带降雨测量卫星的降雨数据(TRMM_PR)相结合的方法, 设置了3种降水输入模式, 对堰塞湖形成期内(5月12日—6月9日)的日均入湖流量进行了模拟预报, 并利用监测期内(5月29日—6月9日)入湖径流实测资料与模拟结果进行了对比。结果表明: 根据气象站实测降水数据对TRMM_PR数据进行修正后输入模型(模式3), 比将气象站实测数据直接输入模型(模式1)和将TRMM_PR观测数据直接输入模型(模式2)的模拟结果要好。本文的模拟结果表明, 分布式水文模型可以和星载雷达测雨数据相结合可有效弥补因气象站点过于稀疏、单站控制面积过大造成的资料缺乏问题, 而利用气象站点观测数据对TRMM_PR数据进行修正可以有效改善模型的降水输入, 从而可以提高入湖径流预报精度。

关键词: 缺资料流域; 径流预报; WEP模型; TRMM; 唐家山堰塞湖

中图分类号: P333

文献标识码: A

观测资料在很大程度上决定了水文情势预测预报的精度。然而, 世界上特别是广大发展中国家仍存在较多的无(缺)资料区域, 另一方面, 全球气候变化和人类水土资源开发活动使得许多长系列水文资料丧失了水文连续性而成为新的缺资料流域水文模拟预报(PUB)问题^[1]。分布式水文模型从水循环的动力学机制来描述流域水文过程, 将水循环的各要素过程联系起来进行详细模拟, 并可据水移动介质的物理特性推定模型参数, 这有助于保证它的精度、消除预报不确定性。同时, 它能有效地利用遥感技术提供的大量空间信息^[2], 可在一定程度上弥补地面观测数据的不足, 并为分布式水文模型的参数率定和模型校验创造条件, 使得该类模型具备了应用到缺资料流域径流模拟预报的潜力^[3]。本文从流域水循环的物理机制着手, 以计算机技术和地理信息系统为关键数据处理平台, 以位于涪江流域的唐家山堰塞湖入湖流量及堰前水位模拟预报为应用实例, 构建适用于该区域的分布式水文模拟模型, 并利用流域内4个水文站1976—1980年的逐月径流实测资料, 对模型参数进行率定, 最后结合热带降雨测量卫星的星载雷达测雨数据(TRMM_PR), 对日均入湖径流量进行模拟预报。

1 研究区概况

5.12汶川地震在四川省北川、平武、绵竹等9个县形成了33个堰塞湖, 其中北川唐家山堰塞湖最大, 位于涪江上游支流通口河, 上游集雨面积3 530.5km², 下游由将军石水文站控制。堰顶最低高程为750.2m, 相应的堰高82.8m, 堰顶以下库容约3.2亿m³, 若堰坝溃决, 将严重威胁下游130万人民群众的生命财产安全。堰塞湖入湖径流量的模拟预报, 是制定应急处置措施和下游人员转移安置方案的重要依据。

根据唐家山堰塞湖位置和流域气象水文站点分布情况, 选定涪江(绵阳以上)流域为研究区域,

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A08)

作者简介: 赵志轩(1983-), 男, 河北安平人, 博士生, 主要从事水文水资源与生态水文研究。E-mail: zhaozx@iwhr.com

如图1所示。流域面积12 029.25km²，气象站单站控制面积平均3 007.31km²，远大于国家《水文站网规划技术导则》规定的300 km²/站(雨量站)，属于缺资料流域。

2 分布式水文模型构建

WEP模型是一个具有物理机制的分布式流域水文模型，该模型从水循环的动力学机制描述水的运动，将水循环的各要素和环节联系起来进行详细模拟，模型参数的物理意义明确，可结合研究成果或现场试验推定或测定，具备向无资料流域推广应用的潜力。该模型的结构与水循环过程模拟策略可参考文献[3-4]。

为构建涪江流域分布式水文模型，广泛搜集了涪江流域的地形地貌、土地利用、土壤植被和水文气象等数据，并在GIS平台上将这些数据整理备用。

2.1 气象水文数据 收集到松潘、平武、绵阳、都江堰4个气象站(图1中未标注都江堰站)1956—2005年降水、气温、风速、日照时数和相对湿度的逐日数据，经泰森多边形插值后，作为模型各计算单元的输入数据。研究区内缺乏连续的日径流观测资料，根据资料，选取平武、甘溪、将军石、涪江桥4个水文站的1976—1980年月径流量作为模型校验依据，模型预热期设定为1972—1975年。

2.2 流网构建及子流域划分 流域DEM数据来自于国家1:250 000基础地理信息数据，网格大小为500m×500m，共48 227个单元，其中47 029个单元按坡面汇流进行计算，1 198个单元按河道汇流计算。为进行坡面汇流计算，本文利用自编的Fortran程序对坡面单元进行了编码，建立起各单元的空间拓扑关系，得到了坡面汇流计算顺序；为进行河道汇流计算，按照从上游至下游、从支流到干流的顺序进行河流分段与编码。河流分段时综合考虑了河段自然属性、堰塞湖位置及水文站位置等因素，得到11条河流，共222个河段，河段平均长度2.8km。河道参数(底宽、顶宽、最大深度、曼宁糙率等)参照有关水文(水位)站的大断面测量成果和规划资料进行分段概化与插值。此外，为方便统计各水文站及堰塞湖的模拟径流过程，利用ArcGIS命令将研究区域划分为了11个子流域。

2.3 土地利用数据 采用中科院遥感所从LANDSAT卫星影像图解译出的1985、2000、2005前后3个时期的土地利用数据，精度为1:10万。首先，将原始数据中的23种土地利用类型归并为水域、裸地-植被域和不透水域三大类，其中裸地-植被域进一步划分为高植被、低植被和裸土3类；不透水域进一步划分为岩石、城市地表面和城市建筑物3类。为计算各网格单元上各类土地利用的面积率，利用Arc Workstation中的Fishnet命令，生成流域网格单元，并得到各网格ID号，再计算每个网格上各土地利用类型的面积，并以此为依据，利用Fortran程序得到各网格单元上各类土地利用的面积率，作为模型的输入文件。模拟期及预报期内其他年份的土地利用数据，根据上述3个时期的数据经分段线性内插得到。

2.4 土壤数据 土壤类型数据来自《1:100万中国土壤分类图》，土层厚度及土壤质地数据来自《中国土种志》中统计剖面信息，采用Kriging插值法得到土壤类型及厚度空间分布情况，并按照《国际土壤分类标准》将土壤类型重新分为6类，采用下式计算各统计剖面土壤粒径构成特征：

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (1)$$



图1 涪江(绵阳以上)流域地理位置

式中： R_j 为第 j 种粒径的土壤构成； r_{ij} 为第 j 种粒径土壤颗粒在 i 层百分比； h_i 为 i 层土层厚度； n 为土层数。

3 模型校验

3.1 参数估计 模型的主要敏感参数包括土壤参数、地下水含水层导水系数和给水度、植被参数、坡面及河道的糙率和河床的透水系数等。对流域产汇流有重要影响的敏感参数如土壤饱和水力传导系数、地下水含水层导水系数与给水度、河床材料的透水系数与厚度以及Manning糙率等，需选择校正期并根据模拟流量与观测结果的拟合情况，进行参数调试与率定。

3.1.1 土壤 确定涪江(绵阳以上)流域的土壤水分特性参数时，主要依据现场试验测定结果，结合土壤性质进行空间展布，对于缺乏资料的地区，主要依据参数的物理意义进行概化计算(表1)。

表1 土壤水分特性参数^[5-7]

参数	沙土	壤土	黏土	参数	沙土	壤土	黏土
饱和土壤含水率 θ_s	0.400	0.455	0.473	饱和导水系数 k_s	2.5E-4	7.0E-5	3.5E-5
残留土壤含水率 θ_r	0.077	0.115	0.137	Havercamp公式参数 α	1.75E10	645E8	6.576E6
单分子土壤含水率 θ_m	0.020	0.053	0.124	Havercamp公式参数 β	16.95	5.56	9.00
田间持水率 θ_f	0.174	0.318	0.363	Mualem公式参数 n	3.37	3.97	4.23

在蒸发计算及热循环计算时，用到了土壤及其他介质的热力学特性参数(如热容量、热传导系数等)，进而根据土壤的构成和含水率建立了经验公式，以考虑土壤的热力学特性参数随土壤湿度的变化。

3.1.2 地下水含水层 研究区域内下游平原地下水含水层的渗透系数、传导系数和给水度等参数参照《绵阳市水资源规划》(2001)。而山区土壤层参数除参照《北川县水资源规划》(1995)外，结合径流模拟验证推定；由于区域裂隙水发育，传导系数定为：75m/月 \times 土壤层厚度(m)，给水度定为0.03。

3.1.3 植被 植被盖度与叶面积指数随季节变化而发生周期性演替。根据前期模型应用研究成果，结合涪江流域所处地理位置，推算出植被盖度(Veg)与叶面积指数(LAI)、植被高度(h_c)与根系深度(L_r)及植被群落最小叶孔阻抗(r_{smin})等参数，并考虑了植被参数逐月变化。

3.1.4 汇流参数 坡面汇流采用运动波模型计算，涉及到的参数有河道断面面积、网格单元地表面坡降以及曼宁糙率等。地表水流流速受地表粗糙程度的影响，这种影响可用坡面的曼宁糙率来表征，不同的土地利用类型对应的曼宁糙率值不同，参照文献[8]，各类土地利用所对应糙率如下：林地0.3、草地0.1、农田0.2、裸地0.05、裸岩及城市地面0.02、水域0.01，本文首先按照面积加权平均的方法得到坡面单元的Manning糙率，然后根据实测径流过程对该值进行适当调整。

河道与地下水交换量和河床材质特性密切相关。本文将河床材质透水系数除以河床材料厚度的商作为模型调试参数。调试结果：山区河流的参数值为2.0E-05/s，平原河流为3.5E-05/s。

3.1.5 融雪参数 研究区域上游海拔较高，冬季温度较低，将积雪融化系数及融化临界温度作为模型调试参数，依据冬季径流过程，经模型调试，各类土地的融化系数分别为：林地2mm/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、草地3mm/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、裸土5mm/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、城镇用地7mm/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)和冰川雪地1mmP/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)；融化临界温度均为0 $^{\circ}\text{C}$ ；雨雪临界温度均为1 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 校验结果分析 模型校正与参数调试采用试错法^[9]。各水文站模拟径流过程如图2所示。

校验期内的Nash效率系数均在0.7以上，模拟结果总体尚可接受。由于区域周边气象站点稀疏，经泰森多边形插值得到的模型部分计算单元的气象要素与实际值存在差异，部分河段的径流模拟相对误差较大，除位于流域出口附近的涪江桥站为3.91%外，其他站点均超过了10%(表2)。由图2可见，枯水期径流量模拟值较小，主要原因为：(1)在流域中上游局部地区，基岩受高寒地区强烈的冻融风化作用，风化裂隙高度发育，降水入渗系数较高。另外，经实地考察发现，该地区坡面冲沟比较稀疏，可能是由于降水入渗量较大，产流系数较低所致；(2)实际流域水循环动力学机制十分复

杂，模型对流域水文循环的部分要素过程的描述有待进一步改进和完善，如针对流域内存在的冻土区，采取了简化处理，假定当某层土壤温度 $T \leq -1^\circ\text{C}$ 时，假定土壤导水系数 K 按指数形式衰减，即由 K 衰减为 $K \times e^{2T}$ ，事实上，需根据土壤内部水热耦合关系解偏微分方程，以得到水分在冻土内的迁移规律。

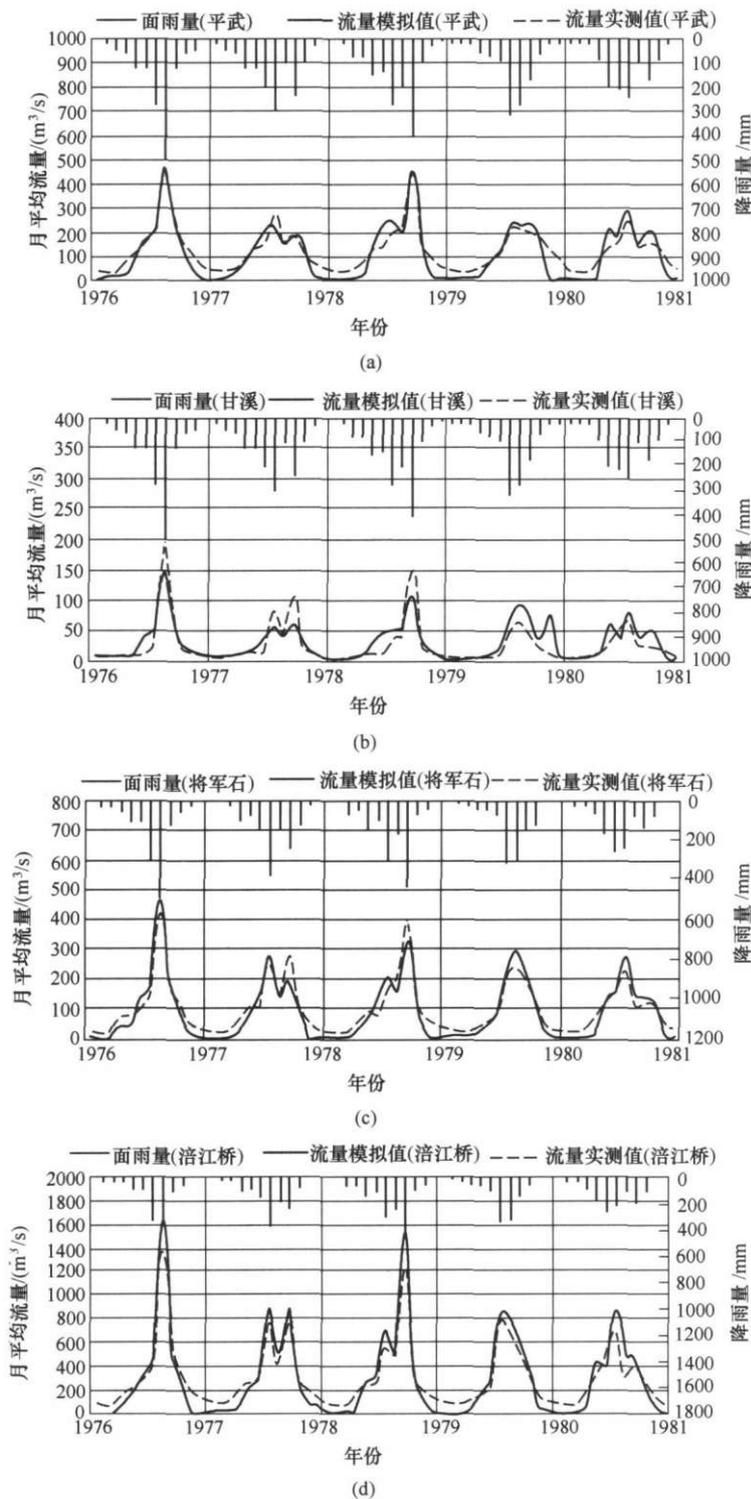


图2 各水文站模拟径流过程与实测过程对比

表2 各水文站月径流过程模拟结果

	年均径流量实测值/亿m ³	年均径流量模拟值/亿m ³	平均相对误差/%	Nash效率系数	复相关系数
平武	39.64	35.21	11.20	0.77	0.94
甘溪	8.05	9.04	12.22	0.71	0.85
将军石	33.04	29.36	11.15	0.86	0.95
涪江桥	94.29	90.74	3.91	0.87	0.98

4 TRMM降雨数据的应用

降雨过程对河道径流过程影响最为直接，降雨输入也是WEP模型最重要的输入数据之一，其准确与否直接决定径流模拟预报的精度。一般情况下，雨量场的时空分异特征较温度场、湿度场、风场和能量场更为显著^[10]。由于通口河流域中下游位于鹿头山、龙门山暴雨区，夏季降雨时空差异较大。为提高径流模拟预报精度，本文采用热带降雨测量卫星(TRMM)的三级产品TRMM_PR(<ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged>)，对降雨进行了修正。该数据集是基于红外亮温资料采用3B-42算法得到的准全球的降水估算数据，其覆盖的空间范围为50°S—50°N和180°W—180°E之间，空间分辨率为0.25°×0.25°，时间分辨率为3h。为防止模型初始水文条件设置的不足，选择2005年1月1日—5月11日作为模型预热期，5月12日—6月9日为预报期。

4.1 TRMM_PR数据同化 首先下载了预报期内TRMM_PR数据，然后根据研究区域范围(东经103°45′—104°59′、北纬31°28′—33°03′)对TRMM网站提供的数据处理程序进行相应修改，读出覆盖研究区域的48个TRMM_PR测雨栅格上降雨量，假定3h内降雨强度不变，将其按时间累加，得到各栅格的每日平均降雨量。

为将TRMM_PR栅格测雨数据降解到模型计算单元上，分别给各栅格和模型计算单元按行列顺序编号，并输出ASCII码文件，然后利用Fortran程序识别这两个ASCII码文件对应单元的空间拓扑关系，确定每个栅格覆盖的模型计算单元个数，最后，将TRMM_PR栅格上的降雨数据赋给其下覆盖的模型计算单元，从而得到模型各计算单元上的降雨输入。当模型计算单元由多于一个栅格覆盖时，按面积加权平均法确定其降雨量。

4.2 模型降雨输入的改进 TRMM_PR测雨的优点是能够反映降雨的时空变化特征，缺点是雨量值精度较差，气象站降雨量精度较高，但是它不能反映降雨的时空变异特征^[11]。本文拟结合二者的优点^[12]，对模型的降雨输入进行修正。思路是：自预报时刻起，以TRMM_PR栅格降雨数据作为自变量 x ，对应的气象站观测雨量作为因变量 y ，逐日建立两组数据的线性相关关系，得到回归方程，然后，将其他TRMM_PR栅格上的降雨数据带入回归方程，得到各TRMM_PR栅格上经过地面站修正的日均降雨量，然后再将其同化降解到模型各计算单元。主要步骤如下。

(1)假设线性回归方程为：

$$P_g = a \times P_r + b \tag{2}$$

式中： P_g 为各气象站雨量观测值； P_r 为对应的TRMM_PR栅格降雨量； a 、 b 为待定常数。

(2)采用最小二乘法建立回归方程，得到下列方程：

$$P_g - \bar{P}_g = r \frac{\sigma_{P_g}}{\sigma_{P_r}} \times (P_r - \bar{P}_r) \tag{3}$$

式中： σ_{P_r} 、 σ_{P_g} 分别为 P_r 、 P_g 系列的均方差； \bar{P}_r 、 \bar{P}_g 分别为各TRMM_PR栅格和对应雨量站数据系列的均值； n 为气象站个数； r 为相关系数，其计算公式为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ri} - \bar{P}_r)(P_{gi} - \bar{P}_g)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{ri} - \bar{P}_r)^2 \sum_{i=1}^n (P_{gi} - \bar{P}_g)^2}} \tag{4}$$

式中： P_{gi} 为各气象站点的雨量观测值； P_{ri} 为对应的TRMM_PR栅格上的降雨量。

至此，可得到式(2)中的系数 a 、 b 的值。

(3)总体不相关($r=0$)的两个变量，由于抽样原因，样本的相关系数不一定为0，因此需要对相关系数进行显著性检验，置信度 α 以概率的形式给出，本文取 $\alpha=10\%$ ，根据气象站个数(4个)从相关系数检验表中查得临界相关系数 $r_a=0.900$ ，当 $|r|>r_a$ 时，认为 P_r 和 P_g 具有相关关系，可以进行下一步计算，否则认为二者不存在相关关系，不进行下一步计算(表3)。

表3 预报期TRMM_PR日均降雨量与气象站实测日均降雨量的线性回归方程

月	日	TRMM_PR日均 降雨量/mm	雨量站日均 降雨量/mm	相关系数	回归方程
5	12	0.940	0.000		
5	13	4.460	4.500	0.160	
5	14	1.007	3.500	0.906	$y=0.125x+3.374$
5	15	1.430	0.000	0.993	$y=2865x-4096.95$
5	16	0.137	0.300	-0.500	
5	17	2.787	1.533	-0.009	
5	18	0.843	0.770	0.949	$y=0.065x+0.218$
5	19	1.587	0.333	-0.690	
5	20	3.757	0.537	0.999	$y=1.744x-6.014$
5	21	0.547	4.033	0.179	
5	22	2.447	0.067	0.917	$y=16.265x-39.729$
5	23	1.050	0.000		
5	24	0.153	0.034	1.000	$y=4.623x-0.675$
5	25	2.583	1.470	-0.279	
5	26	1.220	1.770	0.090	
5	27	0.980	1.733	-0.500	
5	28	0.280	0.103	1.000	$y=2.845x-0.693$
5	29	0.837	16.033	0.062	
5	30	1.023	0.067	-0.589	
5	31	2.260	0.000	-0.651	
6	1	2.757	0.700	1.000	$y=3.881x-9.998$
6	2	1.017	0.400	-0.327	
6	3	0.000	0.067		
6	4	1.520	0.033	-0.017	
6	5	0.117	0.003	1.000	$y=23x-2.68$
6	6	4.447	6.933	-0.324	
6	7	0.137	11.800	0.901	$y=0.022x+11.797$
6	8	0.520	0.803	-0.497	
6	9	1.117	0.470	0.334	
6	10	0.940	0.000		

(4)将覆盖研究区域的TRMM_PR数据作为自变量，代入式(2)，得到各栅格上的修正降雨量。

4.3 相关性差的降雨输入处理 对于TRMM_PR栅格降雨数据和气象站测雨相关性较差的情况，根据各TRMM_PR测雨栅格上的降雨量与该栅格高程的相关关系(图3)，经过最小二乘法回归后，得到修正方程：

$$y = 0.0004x + 0.3194 \quad (5)$$

式中： y 为TRMM_PR栅格上的日均降雨量； x 为栅格对应的海拔高程。

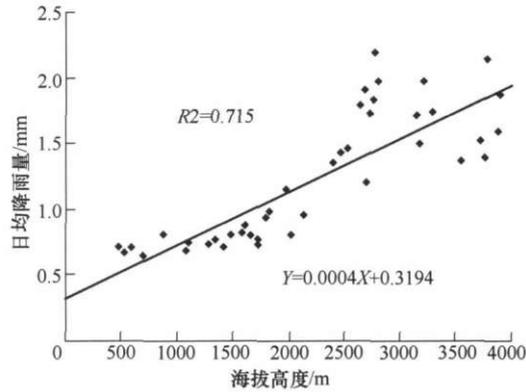


图3 TRMM_PR 栅格降雨量与高程的相关关系

最后，根据模型各计算单元的高程，按式(5)对该计算单元上的降雨量进行修正。

以TRMM_PR栅格降雨数据作为自变量 x ，对应的气象站观测雨量作为因变量 y ，逐日建立两组数据的线性相关关系，得到回归方程。

5 入湖径流预报结果分析

本文设置了3种降水输入模式：(1)根据气象站降雨观测值，经泰森多边形插值展布到各计算单元；(2)直接将TRMM_PR栅格降雨估算数据同化到各计算单元；(3)将经过上述修正后的降雨展布到各计算单元。各降雨输入模式下的预报期日均入湖径流过程及累计入湖流量分别如图4和图5所示，其中模拟值自6月7日起减去了下泄流量，实测流量过程由累积水量逐日反算得到。

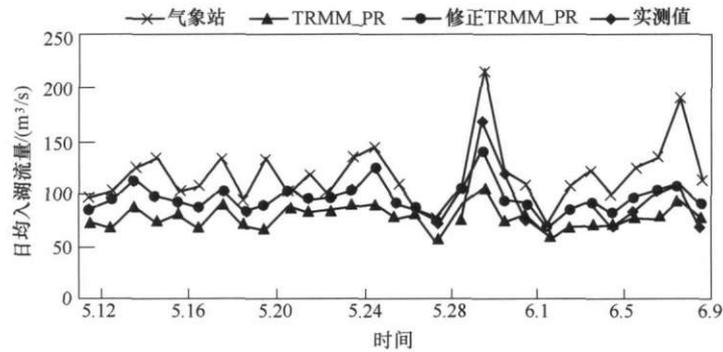


图4 不同降雨输入模式下日均入湖径流预报结果

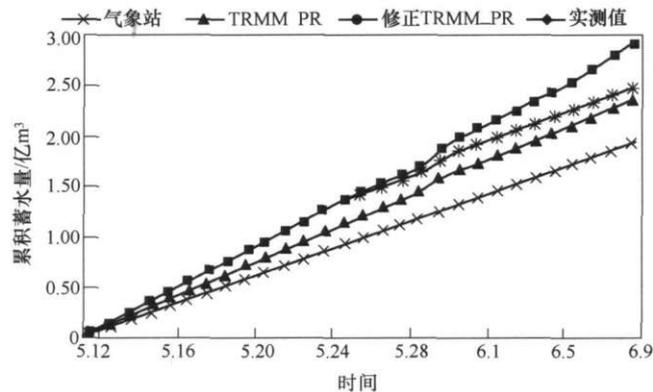


图5 不同降雨输入模式下累计入湖水量预报结果

在模式(1)情景下，模拟预报期内日均入湖流量为 $115.71\text{m}^3/\text{s}$ ，动态监测期内(5月29日—6月9日)日均入湖流量为 $124.25\text{m}^3/\text{s}$ ，与实测值($89.56\text{m}^3/\text{s}$)相对误差为38.73%。至6月9日累计入湖流量

2.90 亿 m^3 ，大于实测值 2.46 亿 m^3 ，相对误差为 17.89%。经分析，造成日径流模拟误差过大的原因主要有以下 2 点：(1) 在模型校验阶段，由于没有收集到连续的日径流观测数据，仅对月径流过程进行校验，而降水要素在日时间尺度上的随机性比月尺度上具有更大的随机性和时空变异性，与实际降雨过程的偏差在短时间尺度上更大，这种偏差通过模型传递给了作为模型输出的日径流过程；(2) 由于流域内气象站点过于稀疏，基于气象站点的泰森多边形插值并不能准确反映雨量场的时空变异特征，展布到各模型计算单元上的降雨量与该单元上的实际降雨量可能存在较大差异，这种降雨输入误差导致了日径流过程出现较大偏差。

对于模式(2)，模拟预报期内日均入湖流量为 $76.61m^3/s$ ，动态监测期内日均入湖流量为 $76.69m^3/s$ ，与实测值相对误差为 14.37%，至 6 月 9 日累计入湖流量 1.92 亿 m^3 ，与实测值相对误差为 21.95%。造成模拟结果偏低的原因除上述原因(1)外，主要是由于 TRMM_PR 栅格单元上的降雨量估算精度较低。首先，该方法主要利用云层顶端的红外波段的辐射特征指示降水的可能性，而实际降水来自于云体下方，二者并非一种直接关系，因此单纯利用云层辐射信息计算降水存在一定的缺陷；其次，TRMM_PR 数据的观测仪器以 TRMM 卫星仪器为主，结合微波成像专用传感器(SSMI)、改进的微波扫描辐射计(AMSR)和高级微波探测器(AMSU)等其他仪器资料，数据产品的质量取决于以下资料来源：TRMM 可见光和红外扫描仪 VIRS 资料(1B01)、微波成像仪 TMI 资料(2A12)、TRMM 组合仪器 TCI 资料(3B31)，受仪器精度及分辨率等因素限制，降雨估算值有待进一步提高；最后，设计算法 3B-42 的目的是用于产生 TRMM 高质量/红外降水和降水误差均方根值估计合成资料，该算法本身存在着未知的缺陷。

采用分别经过气象站和高程修正后的降雨数据输入模型时，模拟预报结果得到了一定程度的改善，模拟径流日内分布趋势与实测值较为吻合，模拟预报期内日均入湖流量为 $103.29m^3/s$ ，动态监测期内日均入湖流量为 $94.87m^3/s$ ，与实测值相对误差为 5.93%，至 6 月 9 日累计入湖流量 2.35 亿 m^3 ，略小于实测值，相对误差为 4.47%，基本满足工程除险要求。可见，利用地面站观测雨量修正 TRMM_PR 数据的方法，能够将雨量站精确反映单点雨量、卫星遥感数据有效反映降水时空分布的优点有效的结合，改善了模型的降水输入，取得了较好的径流模拟预报结果。

6 结论与讨论

6.1 结论 唐家山堰塞湖所处山区缺乏连续的逐日实测径流序列，降水强度在空间上的变异性显著，降水输入对 WEP 模型径流模拟效果的影响较大，而地面气象站观测降水数据只能反映该站点所处位置的“点雨量”。基于星载雷达观测的 TRMM_PR 数据可以较好地表征降水强度的时空分布特征，反映场次降水在流域面上的分布趋势，而其对“点雨量”的刻画却不及地面观测站精确。本文根据 TRMM_PR 数据与地面站点数据之间的相关关系，利用地面雨量站的观测结果修正 TRMM_PR 的估算结果，不仅克服了单纯利用云层辐射信息计算降水量的精度限制，同时也弥补了站点稀疏时采用“由点到面”的降水展布方法之不足，取得了较好的径流预报结果。

6.2 讨论

6.2.1 分布式模型用于缺资料地区的优点 集总式或半分布式水文模型所采用的过程控制方程多基于相同的假设——各向同性假定，这种假定基础上的经典水文学理论与流域气象水文及下垫面条件的空间异质性的矛盾是造成径流预报困难的主要原因。在缺资料地区开展径流预报时，这一矛盾显得尤为突出，一般的内插、外延等趋势外推方法往往会使得径流模拟结果存在较大的不确定性。相比较而言，基于物理机制的分布式水文模型在缺资料流域径流模拟预报中具有以下优点：(1) 模型计算单元通常为离散的单元格，结合 GIS 平台可方便地进行数据空间插值和展布，能够反映流域物理特性的空间分异特征；(2) 结合不同时期土地利用、植被等资料，可以反映流域内下垫面动态变化特征；(3) 从水循环的动力学机制描述流域产汇流过程，将水循环的各要素和环节联系起来进行详细模拟，更加真实地反映了流域水循环的物理机制；(4) 参数具有明确的物理意义，因而可以通过现场实

验测定, 或根据水移动介质的物理特性推定; (5)可以借助GIS平台方便地应用卫星遥感观测数据, 弥补观测数据的不足, 并为分布式水文模型的参数率定和模型验证创造了条件。因此, 近年来, 分布式水文模拟理论的逐渐发展, 对于异质性的描述也取得了较大进展, 但是目前尚未找出能适用于所有尺度的过程控制方程, 尺度问题仍然是阻碍PUB的重要因素之一。

6.2.2 提高缺资料流域径流模拟预报精度的途径 研究表明, 当流域内缺乏降水、径流等地面观测资料时, 不同降水输入模式下, 径流预报结果存在较大差异。为进一步提高径流预报的精度, 需加强以下几个方面的研究: (1)重点发展完善气象数据的遥感遥测技术和数据同化技术, 进一步提高地面气象数据产品尤其是降水数据的时空分辨率。雷达测雨数据一般都经过了严格的质量控制和误差调整, 数据质量一般比较可靠, 对于卫星测雨数据而言, 数据误差体系相对复杂, 数据的结构误差和随机误差相对较大, 因此有必要探索、发展新的卫星遥感数据同化技术和方法, 提高卫星测雨数据的可靠性; (2)充分利用国内外雷达网络和星载雷达的降水遥感数据, 弥补缺测资料, 积极探索有效联合卫星遥感的“面数据”与地面气象站“点数据”的计算方法; (3)通过各种环境下流域的现场实验和模型比较研究改善模型对水文循环过程的表述, 使其具有更广泛的适用性, 根据尺度化、多尺度化及复杂性系统方法、非线性模式动力学和生态水文关系等, 建立新的水文学原理。

缺资料流域水文模拟预报涉及水文学的基本理论、方法和技术, 随着人类对流域水循环物理机制认识的不断加深和卫星遥感等新观测技术的不断发展, 采用分布式模型与新观测技术相结合的方法研究PUB问题是未来的发展方向。

参 考 文 献:

- [1] 焦桂梅. 无资料地区水文数据反演及方法研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006.
- [2] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143-154.
- [3] 贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(I)—模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 534-542.
- [4] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] Jia Y, Tamai N. Modeling infiltration into a multi-layered soil during an unsteady rain[J]. Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, 1997, 41: 31-36.
- [6] Haverkamp R, Vauclin M, Touma J, et al. comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration[J]. J. Soil Sci. Soc. Am., 1977, 41: 285-293.
- [7] Mualem Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. Water Resour. Res., 1978, 14(2): 325-334.
- [8] 王国安, 李文家. 水文设计成果合理性评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [9] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European hydrological system—systeme hydrologique European, “SHE”, 2: Structure of a physically-based distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 61-77.
- [10] Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 216-230.
- [11] 许继军, 杨大文, 蔡治国. 分布式水文模型结合雷达测雨用于三峡区间的洪水预报[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 42-48.
- [12] 张利平, 李璐, 叶爱中, 等. 雷达联合雨量计估算区域降水量精度对比[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 1-5.

(下转第 861 页)

- [7] 徐芝纶. 弹性力学(上册, 第二版)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982, 107-108.
- [8] 孔祥安, 江晓禹, 金学松. 固体接触力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 13-16.
- [9] Andelfinger U, Ramm E. Eas elements for two dimensional, three dimensional, plate and shell structures and their equivalence to HR elements [J]. International journal for numerical methods in engineering, 1993, 36: 1311-1337.

Adaptability of a simplified analytic method for elastic base-board on soft foundations

ZHU Shou-feng¹, LI Tong-chun¹, DENG Dong-sheng²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Water Souvce Company Ltd. of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210099, China)

Abstract: A method that cut out a beam with unit width from a plate is usually applied to structure analysis of base plate of sluice and pump station on soft foundation. It should be pointed out that the stress and strain characteristics of this kind of plate obtained from this simplified analytic method can not be expressed entirely. In this paper a semi-analytic FEM is used to analyze the behavior of force-bearing and deformation of elastic base-board with different ratios of length to width and different elastic base modulus in semi-infinite space. The plane strain analysis under the same mechanical parameters is also carried out. The comparison shows that the maximum tensile stress obtained from the plane strain algorithm is 33% larger than that obtained from the space algorithm. The ratio is increased with the ratio of stiffness.

Key words: soft foundation; base-board; FEM; simplified analytic method; adaptation

(责任编辑: 李 琳)

(上接第 856 页)

Predicting inflows to Tangjiashan barrier lake based on WEP model and TRMM precipitation data

ZHAO Zhi-xuan, YAN Deng-hua, WANG Hao, JIA Yang-wen

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to solve the problem of simulating and predicting inflows to barrier lakes in ungauged region, this study took Tangjiashan barrier lake as the research object which caused by Wenchuan earthquake on May 12th, 2008. The distributed hydrological Model WEP and the TRMM-based precipitation estimates were combined together and 3 precipitation input scenarios were considered. The average daily inflow to the lake during the forming period of barrier (May 12th-June 9th) was simulated and predicted. The result was compared with the observed inflow during the monitoring period (May 29th-June 9th). It shows that the modified precipitation data (i.e. modified TRMM_PR data by the gauge data, mode 3) can generate more accurate results than the other two modes (i.e. gauge data and TRMM_PR data that directly input to the model). It may conclude that by connecting the distributed model with TRMM_PR data the problems caused by the scarcity of gauge stations can be solved. The modification of TRMM_PR by gauge data can improve the precipitation input of the model and generate more precise simulated results.

Key words: ungauged basins; inflow prediction; WEP model; TRMM; Tangjiashan barrier lake

(责任编辑: 王成丽)