

## 基于径流模拟的分布式水文模型参数的空间响应研究

吴 军<sup>1</sup>, 张万昌<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 中科院 大气物理所 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

**摘 要:** SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是一个集成遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 和数字高程模型 (DEM) 技术的基于水文过程的、具有较强物理机制的先进的分布式流域水文物理模型。为了进一步研究流域尺度内水文过程的时空变化规律, 深入了解流域水文时空过程与气象、地-气界面条件及流域地貌特征间的关系, 选取汉江上游马道流域, 运用 AVSWAT 2000 版模型进行 1981~1985 年间的年、月径流模拟, 以月径流模拟的 N-S 模型效率系数为主要指标, 率定出月模拟效果最佳时 (N-S 模型效率系数达 0.942 7) 的各参数值。在此基础上从马道出水站点沿主河道往上游再选取 6 个控制点, 用前面率定好的参数来模拟各个控制点的出口流量, 并研究径流模拟的空间响应, 提出归一化径流面积比指数。分析指出当蒸发量小于月平均降水量时, 马道流域不同面积研究区的归一化径流面积比指数趋于稳定值, 当蒸发量接近或者大于月平均降水量的时候, 随着研究区面积由大到小的变化, 归一化径流面积比指数波动加剧, 研究区面积越小, 归一化径流面积比指数值的偏移量越大。

**关键词:** 马道流域; SWAT 模型; 径流模拟; 空间响应; 归一化径流面积比指数

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)05-0001-06

## Spacial Responses of the Parameter of Distributed Hydrological Model Based on Runoff Simulations

WU Jun<sup>1</sup>, ZHANG Wan-chang<sup>1,2</sup>

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. START Regional Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

**Abstract:** SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is an advanced, physically based, distributed hydrological model which is integrated with Remote Sensing (RS), Geographic Information System (GIS) and Digital Elevation Model (DEM) techniques. In order to study the time-space changing regularity of hydrological process and find out the relationship among hydrological time-space process, meteorology and physiographic characteristic of river basin, yearly and monthly runoff simulations (1981~1985) were applied to Madao catchment located on the upper stream of the Hanjing River Basin. After ascertaining the optimal parameters, satisfying simulation results were obtained with the accuracy of 0.9427 for Nash-Sutcliffe coefficient over the 5 years continuous monthly simulations on discharges, which suggest an excellent modeling performance of SWAT 2000 in the study basin. 6 referenced sub-drainage basin were selected on the upper stream of the Madao main riverway, monthly runoff simulations were applied to them with the same parameters as Madao catchment, then the spacial responses of runoff simulation were studied and the normalization of runoff area ratio were presented. Analysis indicated that, when monthly real evaporation less than monthly precipitation, normalization of monthly runoff-area ratio of different study areas in Madao catchment would be stable; when monthly real evaporation approach or more than monthly precipitation, normalization of monthly runoff area ratio fluctuate accelerate as the study area vary from large to small, the more smaller the sub-drainage basin was, the large offset the normalization of monthly runoff-area ratio would be.

**Key words:** Madao; SWAT model; runoff simulation; spacial response; normalization of runoff area ratio

水文模型是水文学研究中重要的方法和手段之一。近年来,随着 RS、GIS 技术的发展,集成 RS、GIS 和 DEM 技术的分布式水文模型强势发展<sup>[1~4,9~16,19]</sup>。其中,SWAT 模型<sup>[9]</sup>以其强大的功能、先进的模型结构以及高效的模拟能力,在分布式水文模型中占有十分重要的地位,在北美和欧

洲的许多流域都取得了较好的模拟效果,国内的研究也日益增多,如:王中根,刘昌民等(2003)<sup>[11]</sup>、黄清华,张万昌等(2004)<sup>[12]</sup>对西北寒旱区黑河流域水文过程的模拟研究,刘昌明等(2003)<sup>[13]</sup>对黄河河源区的大尺度流域水文模拟,张东,张万昌等(2004)<sup>[10]</sup>对 SWAT 模型气象模拟器的改进,

收稿日期: 2006-07-29

基金项目: “973”项目(2006CB400502, 2006CB309404); 中科院“百人计划”择优支持项目(8-047401)

作者简介: 吴军(1982-),男,江苏张家港人,硕士研究生,主要从事遥感与地理住处系统及其在水文学中的应用方面的研究。

和朱利,张万昌等(2005)<sup>[14]</sup>对汉江上游水资源的气候响应的研究等。

为了进一步推进分布式水文模型的发展,本文对分布式水文模型的模型参数在空间上的响应特性<sup>[5~8]</sup>进行了研究。首先就是要在一个流域内就某个分布式水文模型其一套模型参数能够给出该流域的最佳模拟效果,然后将这一整套模型参数运用于该流域内任意子流域的模拟,分析径流模拟中参数的空间响应特性。基于此运用具有较强物理机制的 SWAT 模型对汉江上游马道流域进行径流模拟,并率定出一套能使模型模拟效率最佳的流域模型参数,沿主河道往上游选取 6 个子流域出水点,运用率定好的参数对各个子流域进行径流模拟,并对模拟结果进行详尽的空间上的响应分析,以强化流域水文时空过程与气象、地一气界面条件及流域地貌特征间关系的认识。

## 1 SWAT 模型简介与研究区概况

SWAT 模型是 Arnold J G 博士等为美国农业部(USDA)下属的农业研究局(ARS)开发的大、中尺度的长时段流域环境模拟模型,该模型具有很强的水文物理机制,是一个优秀的分布式水文模型,可以对不同的土壤条件、土地利用类型、气候状况和人类活动的干扰做出有效的径流模拟预测,因而也可以用来对径流模拟参数的空间响应进行研究。

SWAT 模型由站点的气象资料驱动,将研究流域划分为若干个子流域,结合土壤资料和土地利用资料再划分为若干个水文响应单元(Hydrologic Response Units, HRU),HRU 内的土壤和土地利用类型是一致的。以 HRU 做为最小水文模拟单元进行流域径流模拟,每个 HRU 的产流由地表径流、壤中侧向流、浅层蓄水体回流和地下水的补给 4 部分构成。利用改进的推理方法计算单元产流对河道出口的水量贡献,采用变动储水系数模型或者马斯京根法计算河道的汇流,扣除水面蒸发、传输损失以及流域内人、畜用水,便可得到河道出口的断面流量。

汉江上游地区位于秦岭南麓,南接大巴山、米仓山,西端与嘉陵江相邻,汉江由西向东横贯整个研究区域。该地区属北亚热带季风气候区,具有四季温暖,雨量充沛,干湿分明的气候特征,年平均降水量为 928 mm,最大年降水量为 1 372 mm,最小年降水量为 861 mm,年最大与最小降水比率约为 1.6,年际变化较大。流域内多年平均气温 14℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温 -13℃,最大风速 21 m/s,平均蒸发量 848 mm,流域内地貌条件复杂,气候变化多样,垂直地带性明显<sup>[18]</sup>。本文选取位于汉江上游地区马道流域作为研究区,以马道水文站为控制站点,流域面积 3 416.4 km<sup>2</sup>,海拔高程 600~3 400 m,经度 106°40′15″~107°25′34″,纬度 33°28′03″~34°11′08″。

## 2 基于 SWAT 模型的径流模拟

### 2.1 模型的数据输入

SWAT 模型径流模拟需要以下几种输入数据:流域的 DEM、土地利用/覆被数据、土壤类型数据和气象输入数据。

#### 2.1.1 DEM 数据

流域的地形地貌特征决定了流域的坡度、坡向、水沙运

移方向、汇流网络、流域界线等流域特征参数的形态特征。本文的地形数据来源于研究区 120 m 精度的 USGS 格式的 DEM,作为 SWAT 模型的第一输入数据,据此可以自动进行河网的提取,子流域的划分以及其他地形参数的获取,见图 1。

#### 2.1.2 土地利用/覆被数据和土壤类型数据

土壤分类图由 1:25 万的汉江上游地区土壤图数字化得到。每种土壤的分层层数、各层有机质含量及机械组成可以查看相关文献<sup>[17]</sup>获取。其中机械组成通过插值算法的光滑不等距法将土壤级配换算为 SWAT 模型采用的美制标准,将粒径转换数据结合美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW,建立模型所需的流域土壤数据库。

利用汉江流域的 500 m 分辨率 MODIS 影像,进行监督分类,经实地调查验证,得到土地利用/覆被图。植被覆盖类型代码与模型附带的植被生长数据库、农业管理数据库相联系,模型运行的时候调用相关数据库自动生成模型输入文件。

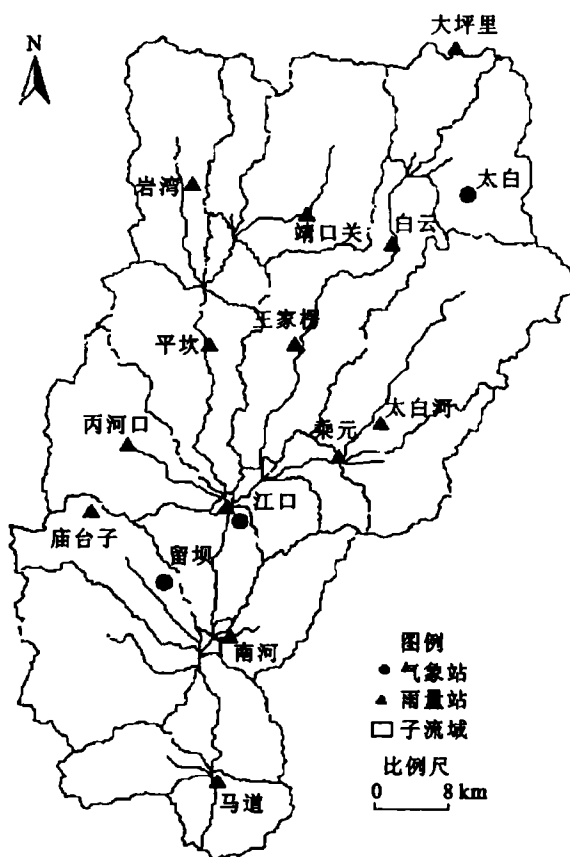


图1 马道流域水系、河网、雨量站和气象站分布图

#### 2.1.3 气象数据

模型驱动使用的气象资料包括实测降水量资料、蒸散发资料和天气发生器模拟的最高最低气温、太阳辐射、相对湿度和风速资料,时间序列从 1981~1985 年。使用张东,张万昌等(2004)改进后的气象数据预处理模块和天气发生器可以在没有实测资料的情况下根据多年逐月统计资料模拟计算出模型所需的逐日输入数据,以有限的气象观测数据来模拟得到模型运转所需的气象数据库。

2.2 模型参数率定与径流模拟

采用 120 m 精度的 DEM 提取流域河网时,设定上游集水面积阈值为 7 800 km<sup>2</sup>,生成流域面积为 3 414.4 km<sup>2</sup>,采用优势地面覆盖/优势土壤类型方法生成 HRU,阈值为 10/20,即按照子流域面积 10% 以上的土地覆被/利用及此类土地覆被/利用 20% 以上的土壤类型生成 HRU。本文研究的马道流域分成 23 个子流域和 64 个 HRU。由于有完整马道流域的 13 站日降雨数据和三站点的蒸散发数据,故径流模拟方法选择“日降水数据/径流曲线方法/以日为单位”进行径流演算,潜在蒸散发的模拟方法选用 Penman-Monteith 方法,河道的演算选用变动存储系数模型法。

SWAT 的年月日产汇流机制相同,但是驱动模型的气象资料是不同的,由于分布式逐日气象数据的空缺,只能通过 SWAT 模型的气候模拟器来模拟生成,由此产生的逐日气象资料 and 实际值有较大的误差,而对于月或者年模拟这种误差就相对小的多,因而,SWAT 模型对于年、月的模拟精度要远远高于日模拟。本文选用的时间尺度为月,运行 SWAT 模型进行参数率定和径流的模拟研究,并且以月径流效率系数为评价指标。

2.2.1 参数率定

参数率定的目的是提高模型效率,而模型效率反映了模型在研究区的适应性,一般可以由以下几个指标来判断:

(1)  $R^2$ : Nash 与 Sutcliffe 在 1970 年提出的模型效率系数(Nash 系数),用来评价模型模拟的精度,直观的体现了实测与模拟流量过程拟合程度的优劣,表达式为:

$$R^2 = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}) \tag{1}$$

(2) RE:模拟径流量和实测径流量的多年平均相对误差,即:

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \tag{2}$$

(3)  $RE_m$ :峰值的相对误差,即:

$$RE_m = \frac{Q_m - Q_{simm}}{Q_m} \tag{3}$$

式中: $Q_{obs,i}$ ——观测的径流量; $Q_{sim,i}$ ——模型模拟的径流量; $\bar{Q}_{obs}$ ——观测径流量的平均值; $Q_m$ ,  $Q_{simm}$ ——实测月径流和模拟月径流的峰值。

模型效率主要取决于 Nash 系数  $R^2$  值,  $R^2$  越接近于 1 表明模型效率越高,同时 RE,  $RE_m$  也是模型效率的重要指标,其值越接近于 0 表明模型模拟得越好。在模型参数率定过程中,一般很难使这 3 个模型效率指数同时达到最好的值,因而可以根据模拟研究的需要综合取舍来率定出满足要求的模型参数。

决定模型效率的因素除了模型对模拟过程的精确表达,还在于模型敏感性参数的最优化选取,这是因为任何模型在模拟过程中进行数学表达的时候都不能完全的基于物理实

质,所以找出模型的敏感参数,并对这些参数以模型效率优先的原则加以率定至关重要。SWAT 模型径流模拟中 LAT\_TTIME、ESCO、CN2、SOL\_AWC 等参数均需要率定,但是这些参数并不是对所有流域都敏感,大量研究<sup>[10,14,15,20]</sup>表明在本流域最敏感参数主要有如下 2 个:土层侧流延迟时间 LAT\_TTIME,土壤蒸发补偿系数 ESCO。对以上 2 个关键参数做了敏感性实验(图 2),并在此基础上率定出流域水文参数的最佳取值。

表 1 主要的模型水文参数

参数名	参数描述	参数值
SMFMX	最大融雪度日因子	5.5 mm/℃
SMFMN	最小融雪度日因子	4.5 mm/℃
SNOCVMX	100 %积雪覆盖时雪水阈值	300.0 mm
SURLAG	地表径流延迟时间	4 d
FFCB	初始土壤水与田间持水量比	0.7
LAT_TTIME	土层侧流延迟时间	8 d
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.1
EPCO	植被吸收补偿系数	0.9
GW_DELAY	地下径流延迟时间	90 d
ALPHA_BF	基流消退系数	0.009

由敏感性分析可知:这两个参数的确对模型效率有较大影响,经过优选后则可以得到更佳模型效率。在本次实验中,LAT\_TTIME 对模型效率的影响最大,随着 LAT\_TTIME 值的增大,Nash 系数  $R^2$  和平均相对误差增加,峰值误差则是先减小后增加;随着 ESCO 的增大,Nash 系数  $R^2$  减小,平均相对误差增大,峰值误差先减小后增大,这里 LAT\_TTIME 取 8,ESCO 取 0.1 为最佳,以确保模型效率较大的情况下,峰值误差略微的增大。经过率定,模型的主要水文参数见表 1:

2.2.2 径流模拟结果

利用上面率定的参数,选取 1981 ~1985 年马道流域土地覆盖/土地利用数据、土壤数据和降水、蒸散发等气象数据对该流域 60 个月的平均径流进行模拟,结果见图 3,模拟的效率系数评价见表 2。

表 2 马道流域月模拟统计分析表

项目	Nash 效率系数	模拟与实测相对误差	峰值的相对误差
参数率定前月径流模拟	0.8807	-0.06	-0.157
参数率定后月径流模拟	0.9427	-0.02	0.01

从月径流模拟的效果来看,月径流量和降水量有很好的响应,但是产流的空间分布与降水之间的关系还需要进一步的研究。模拟值与实测值相比,在降水较多的月份(7~10 月),模拟值要大于实测值,而在枯水季节,模拟值要比实测值小。模型效率主要由 Nash 效率系数来判断,从表中可以看出,参数率定前的 Nash 效率系数才为 0.8807,而率定后的 Nash 效率系数提高到了 0.9427,模型的相对误差由率定前的一 0.06 提高到了 -0.02,峰值误差也由率定前的一 0.157 提高到了 0.01,综其三者,加上图中所示,模型的效率整体上是有所提高的,尤其是在峰值的模拟上有了较大的改善,使得流域月径流模拟更加贴近实际,这为之后模型参

数的空间响应研究奠定了坚实的基础。

3 SWAT 模型参数空间响应分析

上面的模拟不仅给出了马道流域最佳模拟效果,同时也率定了一整套的模拟参数,为了研究这套参数在该流域内的任意子流域中的响应关系,本文在马道流域内选取了 6 个子流域作为研究区运用所率定的参数进行径流模拟,并与马道站模拟结果进行比较。

把马道站点控制流域作为第一个子研究区 No1,并在研究区内根据流域控制面积沿着马道流域主河道往上游选取 6 个出水点,以这 6 个出水点为控制点分别提取子流域作为子研究区 No2~No7 (表 3),采用相同的马道流域的土地覆盖/土地利用数据和土壤数据叠加生成 HRU,选用前面模拟过程中率定好的参数(表 1)进行径流模拟,分别计算出其他 6 个研究区的月平均径流量和月平均蒸发量。

区的流域面积计算归一化径流面积比指数 RA,表达式为:

RA = (Q\_i / Area\_i) / (Q\_1 / Area\_1) (4)

式中:Q<sub>i</sub>——第 i 个子研究区的月平均径流量,Area<sub>i</sub>——第 i 个子研究区的流域面积,Q<sub>1</sub>——马道流域(No1)月平均径流量,Area<sub>1</sub>——马道站控制流域面积。1981~1985 年 7 个子研究区的月径流模拟结果见图 4,归一化径流面积比指数见图 5,月平均降水量与实际蒸发量见图 6。

表 3 马道流域各子研究区资料表

	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7
控制点经度/(°)	33.34	33.51	33.54	33.69	33.71	33.83	34.02
控制点纬度/(°)	106.98	106.99	106.98	107.02	107.04	107.10	107.22
控制面积	3416.44	3104.67	2822.30	2413.30	1246.10	512.38	265.55

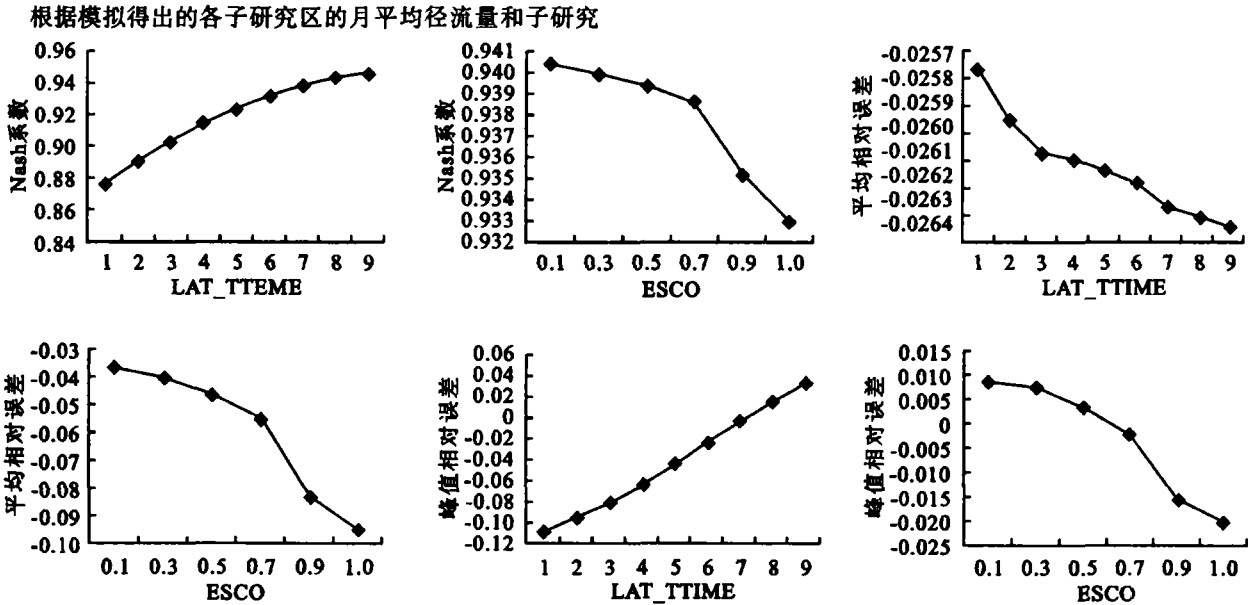


图 2 马道流域模型效率对模型参数 LAT\_TTIME 和 ESCO 的响应

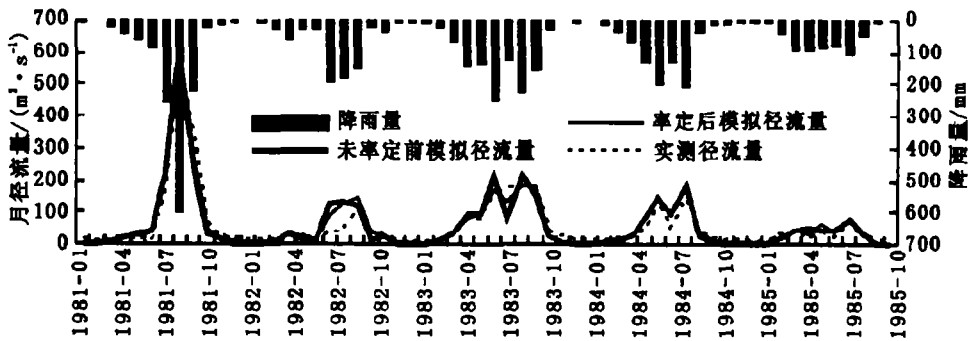


图 3 马道流域月平均降水和月径流模拟图

由图 4 可以看出,各个子研究区的径流模拟结果的变化趋势是一致的,研究区的面积与月平均径流量呈现很强的正相关,汇流面积越大,月平均径流量越大。根据马道流域径流模拟结果可知月平均径流量与该月降水量有很强的相关性,而 SWAT 模型在处理降水数据的时候是按照各个站点的数据通过插值的方法差分到各个栅格上面去,因而栅格的多少就决定了降水量的多少,进而可以将月降水量与月平均径流量的相关关系转换成研究区面积与月平均径流量的相

关关系,所以图 4 所反映的相关关系应该是可靠的。图 5 表示的是归一化径流面积比指数 RA,由图所示,RA 总体趋势是趋近于 1 的,当研究区面积比较大的时候,这种趋势是比较稳定的,当研究区面积比较小的时候,RA 波动加剧,研究区面积越小,这种波动就越激烈。图 6 表示的是月平均降水量与实际蒸发量。在马道流域,每年 5~11 月是丰水季节,这期间虽然蒸发量有所增加,但是降水量要远大于蒸发量;在枯水季节,降水量和蒸发量

接近平衡,有的月份蒸发量甚至要大于降水量。

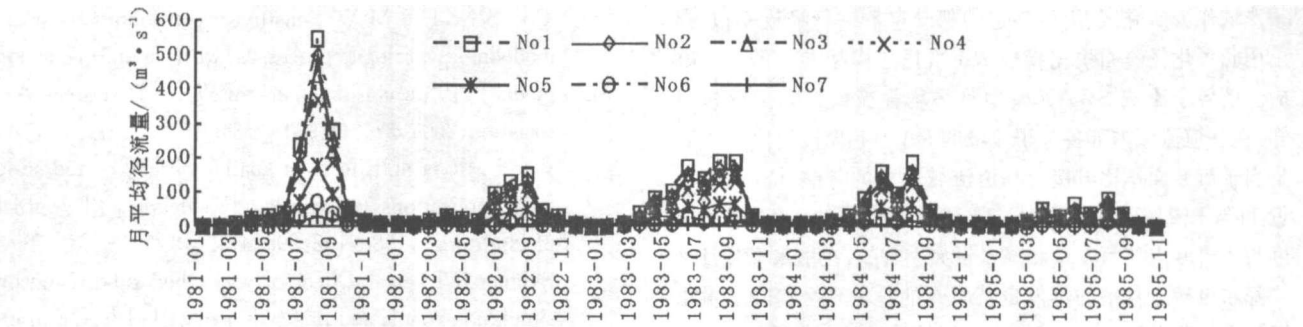


图 4 各子研究区月平均径流模拟值

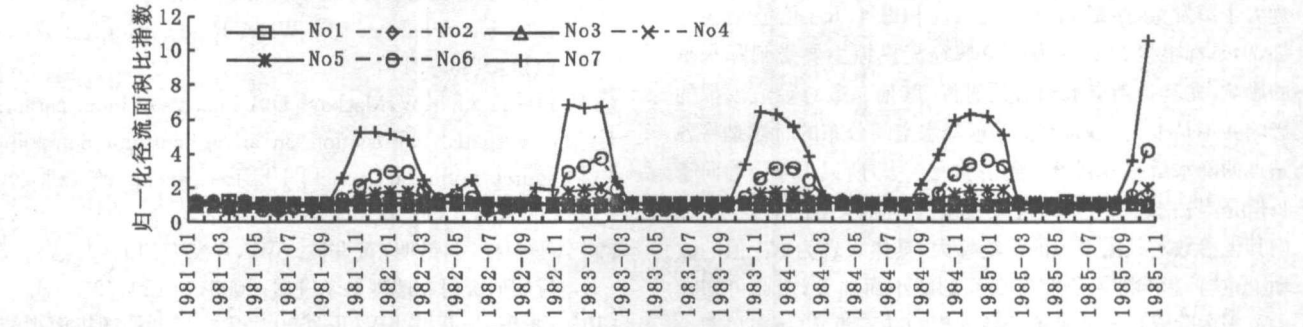


图 5 各子研究区归一化径流面积比指数

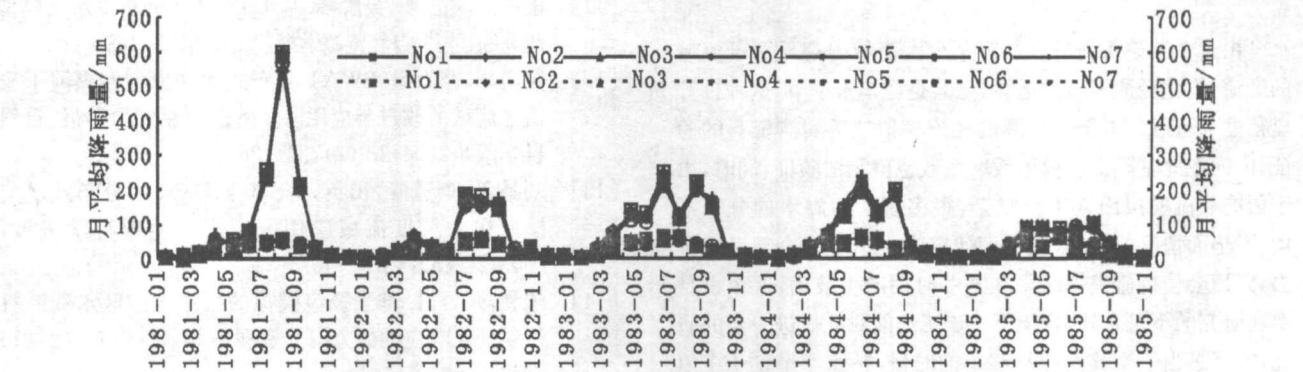


图 6 各子研究区月平均降水量与实际蒸发量

图 4~6 表明:在丰水季节,降水量增加,导致蒸发量增加,研究区产流也增加,RA 趋向去常数 1,研究区的面积对 RA 的影响不大;在枯水季节,降水量减少,蒸发量也减少,研究区的产流也减少,RA 在直线 1 附近波动加剧,研究区面积越小,RA 波动的越激烈。因为在研究区面积比较大的情况下,局部地区的地形、地貌、气候等因素对整个研究区的径流模拟的影响被削弱了,所以 RA 比较平缓;而这些因素在研究区比较小的情况下对径流的模拟则起着尤为重要的作用,所以当研究区面积越小的时候,RA 的波动就越大。

分析可知:在不同产流面积条件下,RA 的变化主要受到月平均降水量和蒸发量的影响。在丰水季节,月平均降水量远大于月平均蒸发量,不同产流面积的 RA 比较稳定,趋近于 1;在枯水季节,月平均降水量接近月平均蒸发量甚至个别月份月平均降水量小于月平均蒸发量,RA 则会偏离常数 1,偏离的幅度与研究区面积有关,研究区面积越小,RA 偏移就越大。这个结论对于我们预测流域内部某个子流域的产流是很有意义的,一定程度上可以简化运算并预测流域

内部产流分布情况,以马道流域为例,当得出马道流域最佳月径流模拟效果时,我们可以粗略推算流域内部任何一个子流域的的月平均径流量,尤其是在丰水季节,这种推算显得尤为可靠。

4 总结与展望

本次研究主要针对汉江上游地区马道流域,通过参数率定,确定了流域径流模拟最佳参数,并且对马道流域进行了月径流模拟,取得了理想的结果,模型 Nash 效率系数达到了 0.942 7,径流模拟值与实测值的相对误差仅为-0.02,峰值误差仅为 0.01,这样的结果在汉江上游地区马道流域这样中等尺度、地利因素比较复杂的流域,运用 SWAT 模型进行模拟是完全合理和可行的,因而基于此基础上所做的模型参数空间响应分析也是完全可靠的。

本研究的前提是要在一个流域内就某个分布式水文模型有一整套模型参数能够给出该流域的最佳模拟效果,在此基础上将这一整套模型参数运用于该流域内任意子流域的

模拟,分析参数的空间响应特性。据此,在流域内选取几个子流域作为研究区,用所率定的那套参数进行径流模拟,提出用归一化径流面积比指数  $RA$  来描述模型参数的空间响应。由各子流域 SWAT 模型月平均径流模拟结果分析可知:在马道流域内部各个子流域的  $RA$  值趋向恒定值 1,尤其是当子流域面积比较接近马道流域面积的时候, $RA$  值越接近 1;当子流域面积减小时, $RA$  值会发生波动。 $RA$  波动幅度与子流域内部蒸发量和降水量大小有关,在枯水季节月平均降水量接近月平均蒸发量甚至有的月份月平均降水量小于月平均蒸发量,这个时候  $RA$  值的波动比较剧烈,而且流域面积越小, $RA$  值波动的幅度就越大;在丰水季节,降水量远大于蒸发量,虽然随着子流域面积减小  $RA$  值波动会增加,但是都很接近 1,这表明流域径流模拟主要受到降水量的影响,尤其是当丰水季节的时候,其他参数对径流模拟的影响并不是很大,因为本文处理降水空间分布的时候是将各站点的降水量差分到各个栅格单元上去,所以  $RA$  会趋向于 1;但是当枯水季节,尤其是蒸发量大于降水量的时候,流域内其他参数对径流模拟的影响增大,具体表现为  $RA$  值的波动上,这种影响随着研究区面积的减小而加大,由此可知在大范围内除降水量外其他参数的影响并不明显,而在局部小范围内地形、地貌等一系列的参数对径流模拟的影响比较明显。

由这个结论我们可以估算某个大流域内部任意子流域的产流,简化径流模拟的运算,尤其是在丰水季节,这种推算显得尤为可靠。由于子流域的径流模拟缺乏实测资料的验证,因而在此基础上的模型效率系数也就无法验证,同时,由于影响径流模拟因素十分复杂,很多因素如降水的分布不均、下垫面情况差异等,在我们研究时也不可能全部考虑进去,因而会使径流模拟结果在某些时期产生波动,这个也是本次研究的不足之处,希望下一步工作能对此做进一步的研究,尤其是当子流域面积足够小的时候,枯水季节的  $RA$  值会产生较大的波动,但这并不是无规律可循的,这正是我们亟待解决的问题,而这些问题的解决对构建高效简便的全分布式水文模型是大有裨益的。

致谢:感谢南京大学国际地球系统科学研究所张东博士为改进 SWAT 气象模拟器所作的研究工作,感谢张万昌教授的长期不懈的指导,感谢为本次研究搜集和整理基础资料做了大量工作的张万昌教授指导的博士生以及硕士生们。

#### 参考文献:

- [1] Abbott M B, Bathurst J C. An introduction to the European hydrological system[J]. Journal of Hydrological Processes, 1986, 87: 45—77.
- [2] Zhang Wan-chang. Water Recourse and Hydrological Process Studies on the URMQI River Basin, Tianshan, China, by means of Remote Sensing and GIS Technique [D]. Japan: Nagoya University, 2000. 123—124.
- [3] Zhang W C, Ogawa K B S Y, et al. A monthly stream-flow model for estimating potential changes of river runoff on the projected global warming [J]. Int. J. Hydrol. Processes, 2000, 14: 1851—1868.
- [4] Cho S M, Lee M W. Sensitivity considerations when modeling hydrologic processes with digital elevation model [J]. Journal of American Water Resources Association, 2001, 37 (4): 931—934.
- [5] Wood E F, et al. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling [J]. Journal of Hydrology, 1988, 102: 29—47.
- [6] Bingner R L, et al. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40 (5): 1329—1335.
- [7] Milly P C D. Effect s of spatial variability on annual average water balance [J]. Water Resour. Res. , 1987, 23 (11): 2135—2143.
- [8] Fitz Hugh T W, Mackayb D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural non-point source pollution model [J]. Journal of Hydrology, 2000, 236: 35—53.
- [9] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22 (1): 79—86.
- [10] 张东, 张万昌. SWAT 2000 气象模拟器的随机模拟原理、验证及改进[J]. 资源科学, 2004, 26 (4): 28—36.
- [11] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18 (2): 168—173.
- [12] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28 (2): 22—26.
- [13] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22 (5): 437—445.
- [14] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学, 2005, 27 (2): 16—22.
- [15] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10 (4): 38—42.
- [16] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33 (6): 1—5.
- [17] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 68—161.
- [18] 中国自然资源丛书编辑委员会. 中国自然资源丛书·陕西卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 392—399.
- [19] Zhang W C, Ogawa K, Yamaguchi Y. Estimation of evapotranspiration in the Urumqi River Basin by means of remotesensing & GIS technique [J]. Hydrol. Process. , 2005, 19: 839—1854.
- [20] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 103—109.