

SWAT 径流模拟及其对流域内地形 参数变化的响应研究

吴军¹, 张万昌^{1,2}

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 中国科学院 大气物理所, 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 AVSWAT2000 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的各参数值。在此基础上从马道出水站沿主河道往上游再选取 6 个控制点,运用 River Tools 软件提取出各个控制点控制流域和地形参数,分析参数变化情况,并在此基础上用前面率定好的参数来模拟各个控制点处的出口流量,分析径流对地形参数变化的响应关系,并提出了归一化径流—河道总长比指数。该指数受到河源密度的影响,在流域内的变化趋于常数 1。

关键词: 马道流域; SWAT 模型; 径流模拟; 河源密度; 归一化径流—河道总长比指数

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2007)03—0052—07

中图分类号: P334⁺.92

Responses of Runoff Simulations to the Change in Topographic Parameters Based on SWAT Model

WU Jun¹, ZHANG Wan chang^{1,2}

(1. International Institute of Earth System Science, Nanjing University,

Nanjing, Jiangsu 210093, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model is an advanced distributed hydrological model which is based on physics mechanism and integrated with Remote Sensing (RS), Geographic Information System (GIS) and Digital Elevation Model (DEM) techniques. In order to study temporal and spatial tendency of hydrological processes and find out a relationship among hydrological temporal and spatial process, meteorology and physiographic characteristics of river basin, yearly and monthly runoff simulations(1981—1985) were applied to Madao catchment located in the upper reaches of the Han River. After ascertaining the optimal parameters, satisfied simulation results were obtained with the accuracy of 0.9427 for Nash-Sutcliffe coefficient over the 5 year continuous monthly simulations on discharges, which suggest an excellent modeling performance of SWAT2000 in the study area. 6 referenced sub-drainage basins were selected in the upper reaches of the Madao main river way, and topographic parameters were obtained using software of River Tools in each sub-drainage. Monthly runoff simulations were then applied to them with the same parameters as Madao catchment, the responses of runoff simulation to topographic parameters were studied, and the Normalization of Runoff total Length Index (NRLI) were presented. Analyses indicate that NRLI is influenced by source density. NRLI fluctuates tempestuously as source density decreases sharply. Nevertheless, it still trends towards the constant 1 in Madao catchment.

Keywords: Madao catchment; SWAT model; runoff simulation; source density; normalization of runoff total length index

收稿日期: 2006-12-08

修稿日期: 2007-03-21

资助项目: 973 项目(2006CB400502, 2001CB309404); 中国科学院“百人计划”择优支持项目(8—047401)

作者简介: 吴军(1982—), 男(汉族), 江苏省张家港人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统及其在水文学中的应用方面的研究。

E-mail: wujunzjg@163.com。

通讯作者: 张万昌(1966—), 男(汉族), 河南省永城人, 博士, 教授, 博导, 主要从事遥感与地理信息系统水文水资源研究。E-mail: zhangw c@tea.ac.cn。

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^[1-5, 10-17]。其中, SWAT 模型^[9]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,不仅在北美和欧洲的许多流域都取得了较好的研究成果,而且在国内的应用研究也日益增多。然而,在模型径流模拟对流域内地形参数响应方面的研究并不多,如王中根、刘昌民等(2003)^[12],黄清华、张万昌等(2004)对西北寒旱区黑河流域水文过程的模拟研究^[13-14],刘昌明等(2003)对黄河河源区的大尺度流域水文模拟,张东、张万昌等(2004)对 SWAT 模型气象模拟器的改进和朱利^[11]、张万昌等(2005)对汉江上游水资源的气候响应的研究等^[15]。

为了进一步推进分布式水文模型的发展,本文就分布式水文模型径流模拟对地形参数空间变化的响应特性进行了研究,以进一步强化对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关系的认识。首先就是要在某一个流域内就某个分布式水文模型率定出一套模型参数,达到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。基于此选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 个子流域出水口,运用率定好的参数对各个子流域进行径流模拟。同时运用 River Tools 软件提取出各个子流域的地形参数,分析其变化趋势^[20],并研究 SWAT 径流模拟对地形参数变化的响应。

1 基于 SWAT 模型的径流模拟

1.1 SWAT 模型概述、研究区概况及资料来源

SWAT 模型是在 SWRRB 模型的基础上发展起来的一个大、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,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下做出有效的径流模拟预测。SWAT 模型先将研究流域划分出若干个子流域,再结合土壤资料和土地利用资料划分为若干个水文响应单元(hydrologic response units, HRU),以 HRU 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、浅层蓄水区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,四季温暖、雨量充沛、干湿分明,年平均降水量为 928 mm,最大年降水量为 1372 mm 左右,最小年降水量为 861 mm 左右,年最大与最小降水比率约为 1.6,年际变化较大,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^[19]。本文以位于汉江上游地区马道流域作为研究区,选取马道水文站为控制站点,流域面积 3 416.4 km²,海拔高程 600~ 3 400 m,经度 106°40′15″—107°25′34″,纬度 33°28′03″—34°11′08″,马道流域水系、河网、雨量站和气象站点分布情况如图 1 所示。

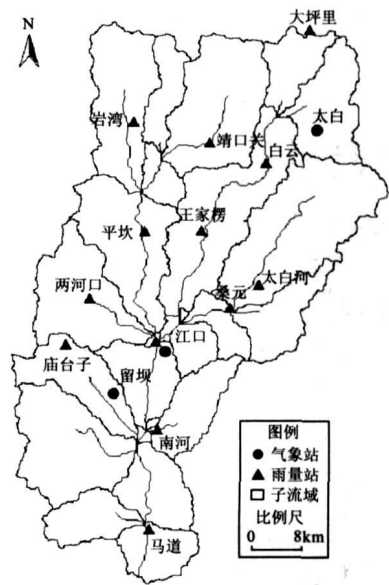


图 1 马道流域水系、河网、雨量站和气象站点分布图

SWAT 模型由站点的气象资料驱动,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 年到 1985 年。模型模拟需要的另一类资料主要是流域的 DEM、土壤图和土地利用/覆被图。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。DEM 是 USGS 格式的,空间分辨率为 120 m,土壤图由 1:250 000 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获取^[18], 流域的土地利用/覆被图由 500 m 分辨率 MODIS 影像, 进行监督分类, 经实地调查验证获得。

1.2 SWAT 模型参数率定与径流模拟

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, 分布式逐日气象数据的空缺可以通过 SWAT 模型的气候模拟器来模拟生成, 由此逐日气象参数的随机震荡性使得日径流模拟值会与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。本文选用的时间尺度为月, 运用 SWAT 模型进行参数率定和径流模拟研究。

用 DEM 提取流域河网时, 设定上游集水面积阈值为 7800 km², 生成流域面积为 3414.4 km², 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。

1.2.1 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, 直观地体现了实测与模拟流量过程拟合程度的优劣, 表达式为:

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

(2) R_E : 模拟径流量和实测径流量的多年平均相对误差, 即:

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

(3) R_{Em} : 峰值的相对误差, 即:

$$R_{Em} = \frac{Q_m - Q_{simm}}{Q_m} \quad (3)$$

式中: $Q_{obs,i}$ —— 指观测的径流量; $Q_{sim,i}$ —— 指模型模拟的径流量; \bar{Q}_{obs} —— 指观测径流量的平均值; Q_m, Q_{simm} —— 分别为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 R_E, R_{Em} 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^[11, 15, 17, 21]表明在研究流域最敏感参数主要有 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, 并在此基础上率定出流域水文参数的最佳取值, 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。以月均径流模拟的 Nash 系数为评价指标, 以 1981—1985 年的实测径流为基础, 对利用 SWAT 模型的马道流域径流模拟进行率定, 据上述实验分析所得, 确定模型的主要水文参数见表 1。

表 1 主要的模型水文参数

参数名	参数描述	参数值
SMFMX/(mm·°C ⁻¹)	最大融雪度日因子	5.5
SMFMN/(mm·°C ⁻¹)	最小融雪度日因子	4.5
SNOCOV MX/mm	100% 积雪覆盖时雪水阈值	300
SURLAG/d	地表径流延迟时间	4
FFCB	初始土壤水与田间持水量比	0.7
LAT_TTIME/d	土层侧流延迟时间	8
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.1
EPCO	植被吸收补偿系数	0.9
GW_DELAY/d	地下径流延迟时间	90
ALPHA_BF	基流消退系数	0.009

1.2.2 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 2, 模拟的效率系数评价见表 2。

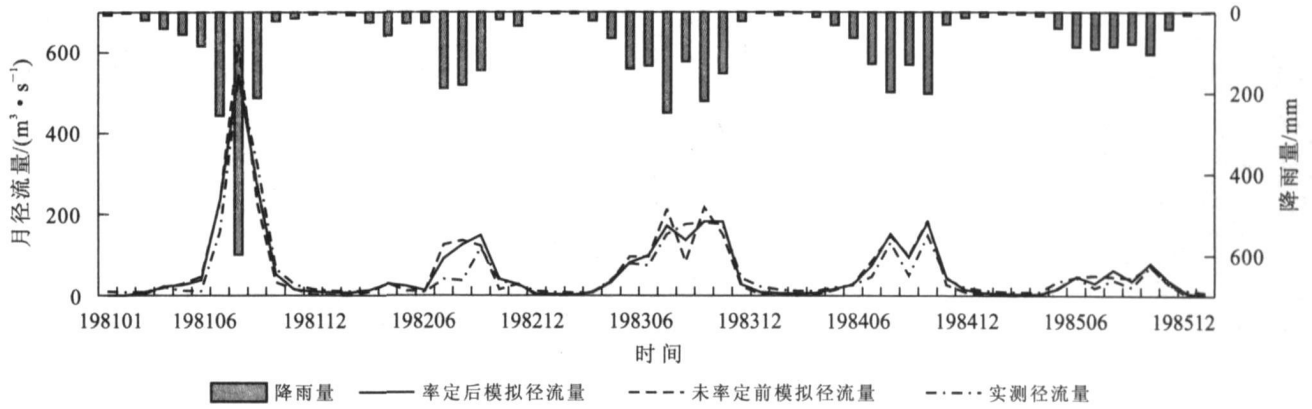


图 2 马道流域月平均降水和月径流模拟图

表 2 马道流域月模拟统计分析

项目	Nash 效率系数 R^2	模拟与实测相对误差 R_E	峰值的相对误差 R_{Em}
参数率定前月径流模拟	0.880 7	- 0.06	- 0.157
参数率定后月径流模拟	0.942 7	- 0.02	0.010

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关系,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-0.06提高到了-0.02,峰值误差也由率定前的-0.157提高到了

表 3 马道流域各子流域地理位置

项目	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

沿着马道流域主河道往上游选取子流域,流域主河道减小,反映到图上就是流域最长河道的相应减小,因而河道总长也相应减小。随着河道总长的减小,流域面积也相应减小。

河流密度是河道总长与流域面积的比值,这个参数描述了一个流域的河道网化程度,随年平均降水和区域地质情况的变化而变化,由图中可知,河流密度值在 1.29~1.34 之间波动,因而马道流域的河网化程度比较均匀。在理论研究中,河网中的源头数目常被假定和河流面积成比例关系,这些量的比值(或比例常数)被称为河源密度,由图中可知马道流域河源

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,为之后研究地形参数对模型径流模拟的影响奠定了坚实的基础。

2 地形参数变化对径流模拟的影响分析

2.1 流域内地形参数变化分析

为了研究流域内地形参数的变化情况及其对径流模拟的影响,本文把马道站点控制流域作为第一个子流域 No 1,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参考研究区 No 2—No 7(表 3),运用 River Tools 软件获取各个子流域地形参数,主要有流域面积、流域直径、最长河道长度、河道总长、河源密度、河网密度,这些参数的变化趋势可以见图 3。

密度在 0.84~0.97 之间波动,从子流域 No4 到子流域 No7 之间有个大幅度的下降。

2.2 地形参数对径流模拟的影响分析

在 River Tools 提取流域和地形参数的时候,最关键的一步是提取出流域的河网,再根据指定的流域出水口提取出流域边界并获得流域面积,所以河网信息是最重要的地形参数,因此,这里我们主要分析流域河道总长对径流模拟的影响。

根据率定好的参数(表 1)运用 SWAT 模型模拟得到各子流域的月平均径流量,并计算归一化的径流—河道总长比指数(NRLI),表达式如下:

$$NRLI = \frac{Q_i / L_i}{Q_1 / L_1} \quad (4)$$

式中: Q_i ——为第 i 个子流域(参考区 No*i*) 的月平均径流量; L_i ——为第 i 个子流域(参考区 No*i*) 的河道总长; Q_1 ——为马道流域(NO1) 月平均径流量; L_1 ——马道流域河道全长。1981—1985 年 7 个子流域的 NRLI 见图 4。

选取 1981—1985 年对 7 个子流域的月径流进行模拟, 对结果分析如下: 子流域的河道总长和主河道是不不断减小的, 根据河源密度图所示, 流域的河源密

度随着流域编号的增加, 整体呈现减小的趋势, 因此流域的汇流面积也是不断减少的。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, 因而流域面积的大小也决定了降水量对径流模拟的贡献大小, 进而可以转化成河道总长与径流量之间的相关关系, 即: 在各子流域中河道总长越长, 同期产生的月平均径流量就越大, 这与模拟所得的子流域径流变化趋势是一致的。

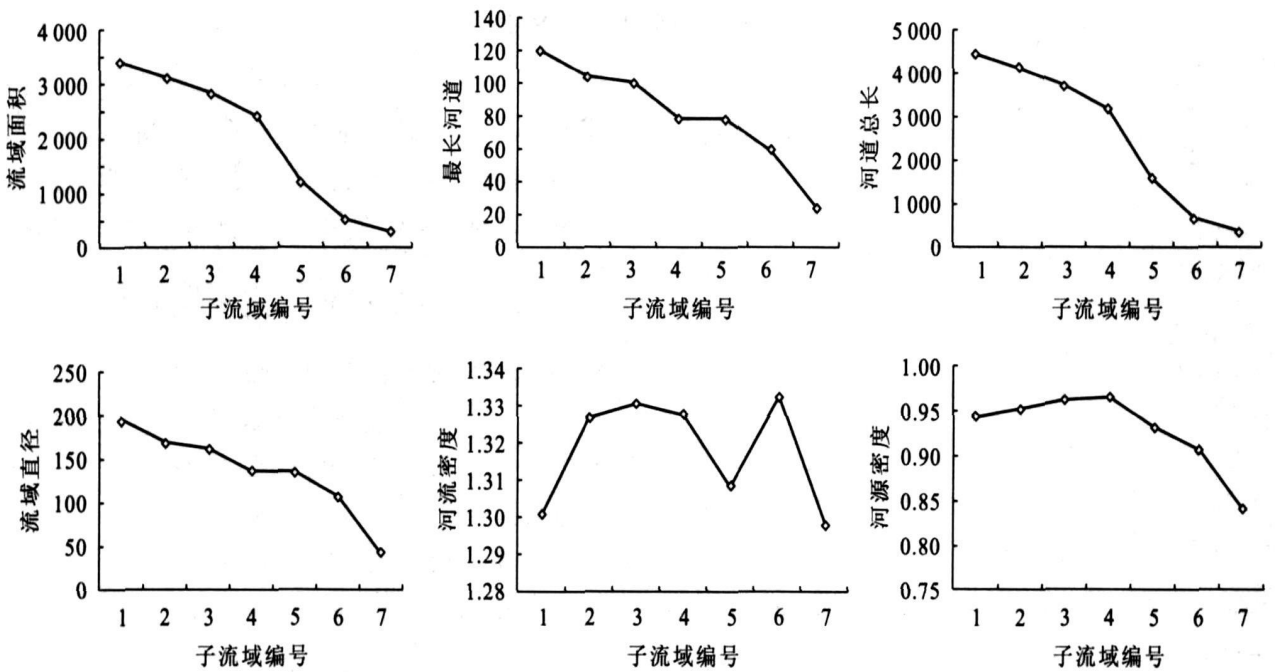


图 3 流域地形参数变化趋势

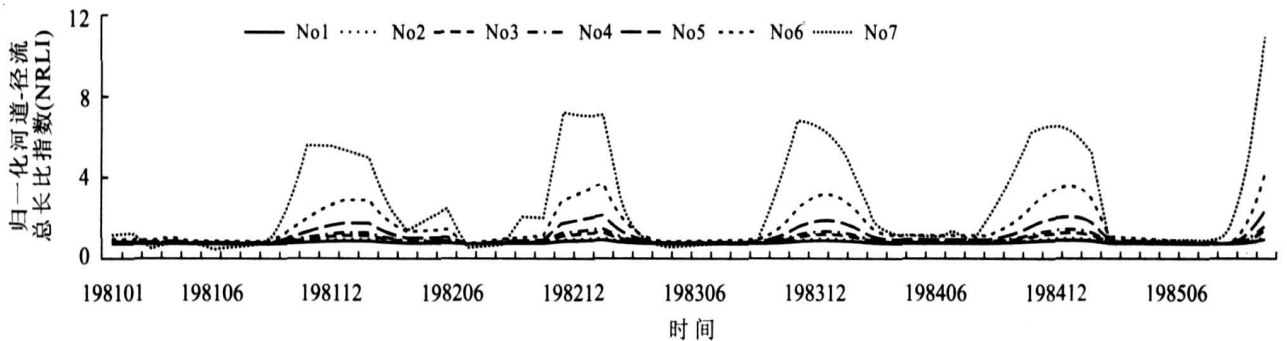


图 4 各子流域归一化的径流—河道总长比指数

图 4 表示的是归一化径流—河道总长比指数 NRLI。NRLI 总体趋势趋近于 1, 这也表明径流量与河道总长存在着很强的相关性, 但是这种相关性会随着河道总长的减小而使得波动加剧, 而且河道总长越短, 波动就越是剧烈。

在马道流域, 每年 5 月到 11 月是丰水季节, 这期间蒸发量有所增加, 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。在丰水季节, 降水量和蒸发量都增大, 降水量远大于蒸发量, 研究区产流也增加,

NRLI 趋向于常数 1, 河道总长越大, 研究区的产流量就越大, 而且 NRLI 也越稳定; 在枯水季节, 降水量和蒸发量都减少, 研究区的产流也减少, NRLI 的波动越明显, 河道总长越小, NRLI 的波动就越剧烈。当降水量大于蒸发量时, 降水量和蒸发量之间差距越大, NRLI 越稳定, 而当降水量与蒸发量比较接近或者降水量小于蒸发量的时候, NRLI 波动就会加剧。在地形参数方面, 分析可知, NRLI 的波动与河源密度存在着一定的联系, 当河源密度波动不大的时候, 研究区 NRLI 也趋向于 1, 而当河源密度大幅度减小时, NRLI 的波动也随之加剧, 尤其是在枯水季节这种波动就更加明显了。

根据这个结论我们可以初步建立起河道总长与径流量的相关关系, 根据某研究流域的月平均径流量, 我们就可以概略推算出各个子流域的径流量, 并且有一定的精度保证, 尤其是河源密度比较稳定的情况下, 推算出来的结果是比较理想的。

3 结论

本次研究主要针对汉江上游地区马道流域, 将马道流域沿着主河道往上游再选出 6 个子研究区作为参考区, 运用 River Tools 软件提取各个研究区的地形参数, 发现各个参数有很强的相关性。同时运用 SWAT 模型模拟马道流域月平均径流量, 通过参数率定确定流域径流模拟最佳参数, 取得了理想的模拟结果, 模型 Nash 效率系数达到了 0.9427, 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、地理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径流模拟对地形参数的响应分析也是完全可靠的。

据此, 在研究区的各个子研究区运用所率定的那套参数进行径流模拟, 提出用归一化径流—河道总长比指数(NRLI)来描述径流模拟与地形参数之间的响应关系。分析可知, 各个子流域的 NRLI 都趋于常数 1, 当河源密度比较稳定时, NRLI 波动的幅度比较小, 当河源密度大幅度减小的时候, NRLI 波动加剧, NRLI 的波动幅度会随着河道总长的减小而增加, 尤其是在枯水季节由于受到降水量和蒸发量的影响, 波动会表现得比较明显, 但是 NRLI 整体是趋向于 1 的, 这就说明了径流量与地形参数之间存在一定的相关性。

由这个结论我们可以建立起径流与河道总长之间的相关关系, 根据某中大流域的月平均径流量和河道总长在一定的气候条件情况下我们就可以粗略的

预测流域内任何一个子流域在某个时期的月平均径流量。相反, 根据子流域径流量我们还可以反推该子流域的河道总长等地形参数, 并且这种推测具有一定的可靠性, 这对于我们的水文预报和监测工作是很有帮助的。但是, 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, 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。总之, 利用 SWAT 模型进行径流模拟以及其对地形参数的响应分析, 对构建高效简便的适合我国地形特征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 W C. Water Recourse and Hydrological Process Studies on the URMQI River Basin, Tianshan, China, by means of Remote Sensing and GIS Technique[D]. Nagoya University, Japan, 2000. 123—124.
- [3] Zhang W C, Ogawa K, Ye B S, et al. A monthly streamflow 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] Zhang W C, Ogawa K, Yamaguchi Y. Estimation of evapotranspiration in the Urumqi River Basin by means of remote sensing & GIS technique[J]. *Hydrol. Process.* 19: 1839—1854.
- [6] Wood E F, Sivapalan M, Beven K, et al. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 102: 29—47.
- [7] Bingner R L, Garbrecht J, Arnold J G, et al. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield[J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(5): 1329—1335.
- [8] Milly P C D. Effects of spatial variability on annual average water balance[J]. *Water Resour Res*, 1987, 23(11): 2135—2143.
- [9] Fitz Hugh T W, Mackay D S. Impacts of input param-

- ter spatial aggregation on an agricultural non point source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236: 35—53.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [19] 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. 3—6, 392—399.
- [20] 张国义, 房明惠, 徐云, 等. RSI River Tools 系统及其应用介绍[J]. *计算机应用*, 2002, 22(8): 38—40.
- [21] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251: 103—109.

(上接第 41 页)

- [38] Mayer L. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(4): 1271—1284.
- [39] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀条件下土壤氮素流失对土壤和环境的影响[J]. *土壤和环境*, 2000, 9(3): 249—252.
- [40] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C:N ratio of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 439—442.
- [41] 杨洪, 易朝路, 等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 507—514.
- [42] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1990. 82—145.
- [43] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 近 40 a 来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. *地球化学*, 2003, 32(5): 453—460.
- [44] 李清河, 李昌哲, 孙保平, 等. 土壤侵蚀与非点源污染预测控制[J]. *水土保持通报*, 1999, 19(4), 54—57.