

# ESSI 分布式水文模型在淮河流域的应用

陈志敏<sup>1,2</sup>, 张万昌<sup>2</sup>, 严长安<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210046;  
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094)

**摘 要:**以淮河小柳巷水文站以上各支流组成的流域为研究对象,应用 ESSI 分布式水文模型对流域出口的年、月、日径流以及流域水文空间过程进行模拟以验证模型的适用性和模拟精度。选取合理的模型运行方案组合,以 2001~2004 年作为模型校准期,率定出模型参数,并用 2006~2009 年的实测水文数据进行模型验证。结果表明 ESSI 模型率定得到的参数在研究区具有一定的代表性,较为准确地概化描述了研究区的水文过程,在淮河流域中上游具有良好的适用性;此外,模拟的水文空间过程与淮河流域的客观规律相近,表明 ESSI 模型对各水文过程具有合理的描述和表达,为水资源的时空动态变化规律研究提供良好的模拟平台。

**关键词:**ESSI 分布式水文模型;径流模拟;水文过程;时空变化;淮河流域

中图分类号:P334<sup>+</sup>.92

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)05-0017-08

## 1 引言

自 1969 年 Freeze 和 Harlan<sup>[1]</sup>发表了题为“一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图”的文章以来,分布式水文模型就以其明确物理意义的参数结构和全面反映空间分异性的特点得到快速的发展和应用。目前,应用较多的分布式水文模型主要有 TOP-MODEL 模型、SWAT 模型和 SHE 模型等,并于不同气候、水文条件下流域的水文过程进行模拟。随着 RS、GIS、DEM 等技术的快速发展,基于 DEM 的分布式水文模型在尺度问题和各要素耦合方面体现出明显的优势<sup>[2]</sup>,使得分布式水文模型得到相应的改进和创新。李致家等<sup>[3]</sup>采用 GIS 地形分布技术和栅格技术,对 TOP-MODEL、新安江模型进行改造,探讨了 GIS 技术的应用和模型的适用性;M.C.Demirel<sup>[4]</sup>等将 SWAT 和人工神经网络结合,并在 Pracana 流域的进行模拟应用取得较好结果;张东<sup>[5]</sup>针对 SWAT 模型在中国寒旱区和汉江湿润水文模拟中发现的问题进行改进,并增加了

数据预处理模块,提高了 SWAT 的模型效率;康尔泗等<sup>[6]</sup>将常规的气象水文数据结合 GIS 技术,参照 HBV 模型的建模思路,建立了一个适合西北干旱区内陆河山区流域的日步长分布式径流模型。

但是总体来讲,分布式水文模型多数还存在缺陷和发展空间,非线性问题、尺度问题、唯一性问题、等效性问题和不确定性问题<sup>[7]</sup>是面临的主要问题。目前国内虽然出现了很多的分布式水文模型,但基本上只适用于某一特定流域或特定气候条件。ESSI 模型深入研究动态产流机制,提出新的基于渗蓄一体化思想的动态产流机制,解决了传统水文模型对流域干旱、湿润气候条件的依赖;充分耦合 RS、GIS、DEM 技术,在合理建立产汇流机制基础上,通过模块搭配,提供了适用于不同时空尺度、不同气候条件下的动态通用水文模型;同时能够获取各分布式水文过程的时空动态分布,为水资源的时空动态变化规律研究提供良好的模拟平台。由于模型良好的扩展性,ESSI 得到不断地研究和发展<sup>[8-14]</sup>,并在汉江江口、黑河干流山区流域<sup>[11]</sup>、雅鲁藏

收稿日期:2013-10-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951404);国家自然科学基金(40971024,41175088)

作者简介:陈志敏(1987-),女,山东东营人,硕士研究生,主要从事水资源、水环境方面研究。

E-mail:chenzhimin070601@sina.com;chenzhimin070601@gmail.com

布江流域<sup>[12]</sup>的不同气候条件下进行验证,并取得了较为理想的结果。

淮河流域地处我国南北气候过渡带,降水量年际变化大,洪涝干旱现象频繁发生,加之近年的水环境污染和闸坝的影响,加大了淮河流域的水资源特性、水文情势的研究。本文将 ESSI 分布式水文模型应用到淮河流域,分析其在气候条件复杂、水问题严重流域的长时段降雨径流模拟精度,进一步验证模型的通用性。以淮河干流的小柳巷水文站为出水口,选择合理的运行方案和参数,将 ESSI 分布式水文模型在气候条件复杂、水问题严重的流域进行长时段降雨径流精度模拟。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,介于长江和黄河两流域之间,位于东经 111°55'~121°25',北纬 30°55'~36°36',全长 1 000km,总落差约 1 100m。淮河流域地处我国南北气候过渡带,淮河以北属暖温带区,淮河以南属北亚热带区,年平均气温为 11~16℃,多年平均降水量约为 888mm,降水量年内分布不均,洪涝旱灾频繁发。淮河流域人口众多,人均水资源占有量较低,属于严重缺水,随着经济的快速发展,水资源和水环境问题日益突出。

淮河干流到了下游出现分支,分三路下泄,文中将流域出水口选取在中下游分支前的小柳巷站,集水面积为 12.4×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,研究区域如图 1 所示。

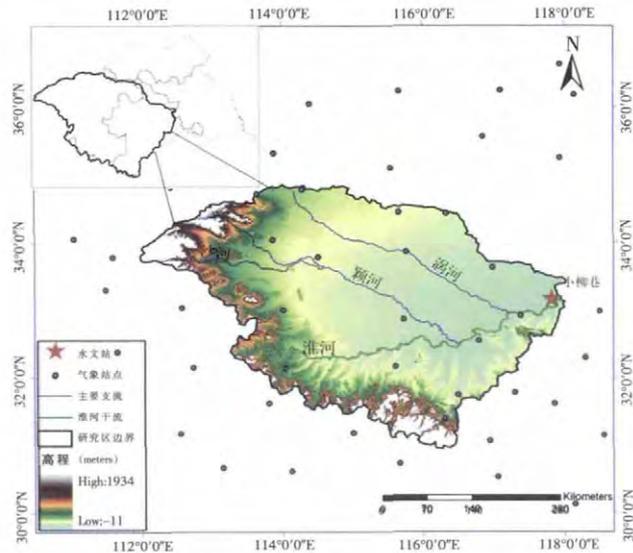


图1 研究区域示意图

Fig.1 Geographical location of the study area in the Huaihe River basin

### 2.2 基础数据来源

ESSI 模型所需要的数据包括地形、土壤、植被等参数数据和降雨、湿度等水文气象参数。DEM 采用的国际科学数据共享网提供的 90m 数字高程数据;整个流域土壤类型较多,本文采用的 FAO(Food and Agriculture Organization, 联合国粮食与农业组织)官方网站([http://www.fao.org/index\\_en.htm](http://www.fao.org/index_en.htm))发布的土壤类型数据,通过土壤参比得到对应的中国土壤系统分类<sup>[13-14]</sup>类型(见图 2),主要的土壤类型有潮土、水稻土、棕壤、黄棕壤、褐土、粗骨土等,在中国土壤库查询得到各种土壤属性建立土壤数据库;植被类型是由中国 1km 精度的数字化土地利用、覆盖分类图提取而来,最终得到整个流域内的土地利用类型有 18 种(见图 3),参考以往 ESSI 模型和 SWAT 模型对植被参数的定义建立植被参数数据库。考虑到模型中采用的坐标系统和计算量大小,对以上数据进行 UTM 投影(WGS84 坐标系,第 50N 分带)和重采样处理,空间分辨率为 1 000m。

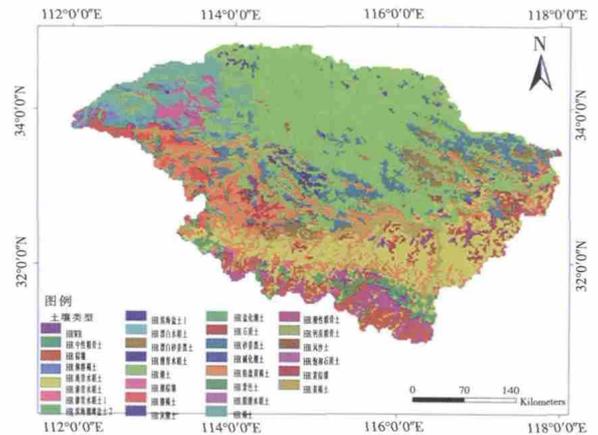


图2 流域土壤类型分布图

Fig.2 Spatial distribution of the soil types

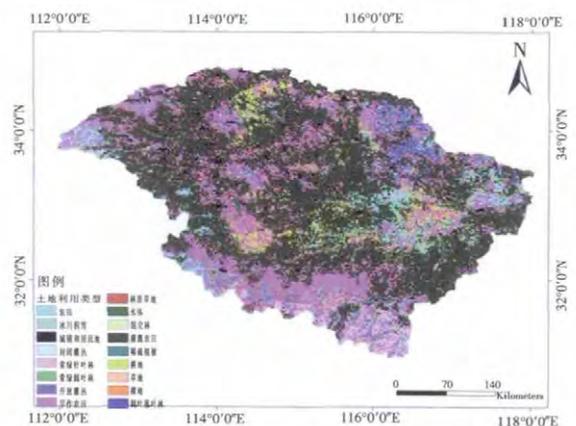


图3 流域植被类型分布图

Fig.3 Spatial distribution of the vegetation types

气象数据选用气象数据共享网提供的中国地面气候日值数据集,所需要素有:日 20 时-20 时降雨量、平均气温、日最高气温、日最低气温、平均风速、平均相对湿度、日照时数。以小柳巷站日均实测流量作为日降雨—径流过程模拟基准数据,其中 2001~2004 年为参数率定期、2006~2009 年为验模型证期(其中 2005 年部分气象站点的平均风速、平均相对湿度、日照时数数据缺失,所以模型模拟中将 2005 年省略)。

### 2.3 ESSI 模型简介

ESSI 模型 (infiltration Excess and Saturation excess Soil-water dynamic Integration model for hydrology)是由张万昌教授和张东博士于 2006 年研制开发的,之后通过课题组不断地研究扩展而发展起来的通用分布式水文模型。ESSI 模型以栅格为水文模拟单元,将大气-植被-土壤中的水文循环过程简化线性处理,概化为 6 个相对独立的子过程:冠层截留、降水融雪、潜在蒸散发、实际蒸散发、地表水下渗、土壤水再分配,完整的构成了垂直方向上栅格水量的输入输出。

栅格产流分为地表径流、壤中流和地下径流 3 类。在地表径流计算中,ESSI 水文模型创新性的提出基于栅格的渗蓄一体化动态产流机制,充分的考虑降雨和下垫面的时空变化,摆脱了传统的产流计算方案对流域气候条件的依赖性。由于降雨量和强度的变化,土壤容重、含水量、包气带缺水量、下渗率等也相应的发生

改变,这就决定了栅格产流的类型也是时空动态变化性。下垫面特征由植被和土壤决定:位于地表上的植被部分主要考虑植被对降雨量和雨强的影响(包括冠层截留、植被的蒸散发);位于土壤中的植被部分主要考虑对土壤水再分配的影响;土壤参数主要考虑在降雨作用下土壤含水量和下渗率对外部供水的调节。综合降雨和下垫面特征的影响,根据霍顿下渗理论、蓄满产流理论和山坡水文学原理,ESSI 模型将栅格产流分为 8 种通用产流类型<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。利用 RS、GIS 和 DEM 技术得到的降雨和土壤水变动特征,确定任意时刻栅格上各产流类型,计算得到地表径流量。根据水量平衡原理,剩余水量就是壤中流和地下径流的总和,根据土壤含水量与田间持水量的关系划分得到壤中流和地下径流的比例。

计算出栅格的各径流量后,经过坡地和河道汇流处理将水量汇集到流域出水口,得到流域的流量过程。ESSI 模型中针对模拟的时间尺度特征,设计了 Muskingum-Cunge(马斯京根-康吉法)、滞时演算法分别用于次洪过程和长时段降雨~径流过程;根据河道汇流特征同时设计了河道分段马斯京根法。

### 2.4 精度评价方法

为检验 ESSI 模型效率与模拟结果的精度,模型采用确定性系数  $NS$ 、相关系数  $R$  和相对误差百分率  $RE$  来进行分析和评价,计算公式如下:

表1 栅格通用产流类型表<sup>[11]</sup>  
Table1 General water yielding type in common grid surface<sup>[11]</sup>

包气带土壤缺水情况	外界供水~包气带缺水对比	雨强~土壤下渗率对比	产流方式	产流代号
	$P - E < 0$ (外部供水不够土壤蒸发,需要从前期土壤水中吸取)	$I < FC$	不产流	①
$D < 0$ (前期土壤水已蓄满)	$P - E > 0$ (外部供水满足土壤水蒸发,还有多余水分产生壤中流和地下径流)	$I > FC$	超渗产流	②
		$I < FC$	蓄满产流	③
		$I > FC$	超渗产流+蓄满产流	④
	$P - E < D$ (外部供水不够土壤蒸发和满足土壤缺水,需要从前期土壤水中吸取)	$I < FP$	不产流	⑤
$D > 0$ (前期土壤水未蓄满)	$P - E > D$ (外部供水除了满足土壤水蒸发和土壤缺水量,还有多余水分产生壤中流和地下径流)	$I > FP$	超渗产流	⑥
		$I > FP$	蓄满产流	⑦
			超渗产流+蓄满产流	⑧

其中: $D$ 表示土壤缺水量; $P$ 表示到达地面的净雨; $E$ 表示土壤实际蒸散发; $I$ 表示雨强; $FC$ 表示土壤表层稳定下渗率; $FP$ 表示土壤表层时段下渗率。

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

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

$$RE=\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i}-Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $Q_{obs,i}$  为实测流量系列 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )； $Q_{sim,i}$  为模拟流量系列 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )； $\bar{Q}_{obs}$  为实测流量系列的均值 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )； $\bar{Q}_{sim}$  为模拟流量系列的均值 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )； $n$  为模拟的时段数。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型率定期水文过程模拟和精度分析

利用研究区流域 2001~2004 年的水文、气象资料,经过多次率定得到模型研究区流域日降雨-径流过程如图 4 所示,可以看出模拟过程与实测过程基本吻合,峰值出现时段一致。但是模拟流量随降雨量的变化更加明显,尤其是在降雨量较少的日期,模拟的日径流量会随着降雨量的变化有明显波动,但是实测值相对比较平缓;在降雨量较大的日期两者的峰值比较一致。这主要与淮河流域闸坝有关,在枯水季节,流域内进行大规模地提水灌溉,人为干扰强

烈,流量过程的起伏变小,致使一些小的洪峰也消失<sup>[15]</sup>;在汛期为了防洪的需要,闸坝开放,所以对总径流量影响不大。

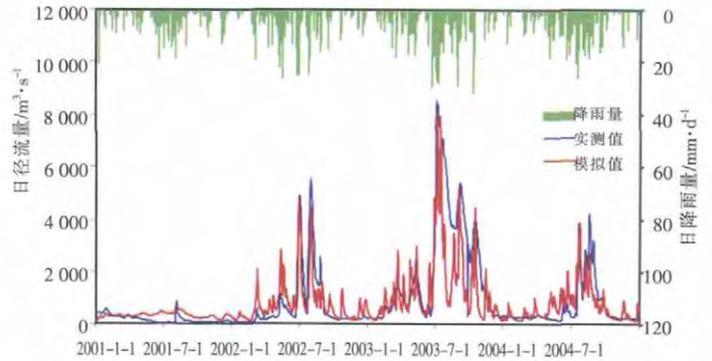


图 4 研究区流域率定期(2001~2004 年)日降雨、径流模拟与实测结果比较

Fig.4 Comparison between the observed and simulated results of the daily rainfall-runoff simulation for the Huaihe River basin during the calibration period (2001~2004)

将日模拟结果按月进行统计平均,分别得到率定期的逐月流量图、月平均流量图(如图 5)。同日降雨-径流过程相似,率定得到的逐月流量与实测流量的峰值出现基本一致,最大值都出现在 7 月份,模拟水文过程曲线的变化趋势要比实测的平缓。同时,月模拟值呈现出季节性变化,在 11、12、1、2 月份,降雨量、实际流量值比较小,模拟流量与实测值较接近或略偏小;3~6 月模拟的流量大于实测值,但是在 7~10 月模拟值小于实测流量。说明 ESSI 模型对枯水期模拟流量与实测值接近,在中水期大于实测值,但在丰水期的模拟值比实测值小。

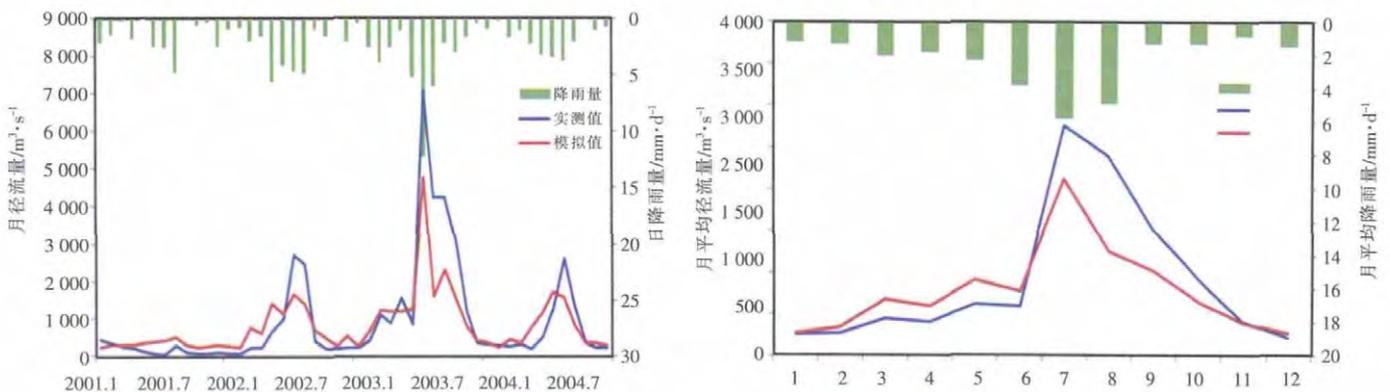


图 5 研究区流域率定期逐月流量(A)、月平均流量(B)与实测结果比较

Fig.5 Comparison between the observed and simulated results of the monthly rainfall-runoff simulation(A) and monthly mean runoff simulation(B) for the Huaihe River basin during the calibration period

表2 淮河流域日、月、年降雨径流过程误差分析表  
Table2 Error analysis of the long term rainfall-runoff simulation model for the Huaihe River basin

	2001~2004 率定期			2006~2009 验证期		
	NS	R	RE/%	NS	R	RE/%
日	0.65	0.82	-11.8	0.61	0.81	-8.5
月	0.72	0.82	-11.5	0.71	0.87	-8.2
年	0.77	0.99	-11.8	0.78	0.98	-12.8

表 2 给出了 ESSI 模型的评价精度结果,其中率定期的日确定性系数达到 0.65,相关性系数为 0.82。随着时间尺度的增加,模型的精确性也随之提高,月、年确定性系数分别达到 0.72、0.77,相关性系数为 0.82、0.99;率定期不同时间尺度的相对误差都为负数且集中在-11.8%以下,图 5 的描述可看出这主要是由于模型在丰水期的模拟值要比实测值要小的原因造成的而降雨量较大的数值对误差的影响比重也较大,造成整体的相对误差呈现负数。

3.2 模型验证期水文过程模拟和精度分析

为了验证模型在研究区流域的适应性,采用与率定期相同的模型运行方案和参数,以 2006~2009 年的气象、水文数据进行验证,得到的日降雨-径流过程如图 6 所示。同样,对日模拟结果按月进行统计平均,得到验证期的逐月流量图、月平均流量图(如图 7),可以看出验证期的日径流模拟、月均模拟流分布规律同率定期基本一致,体现出所率定的参数在淮河流域中上

游有一定的代表性,同时模型水文过程模拟有良好的稳定性。

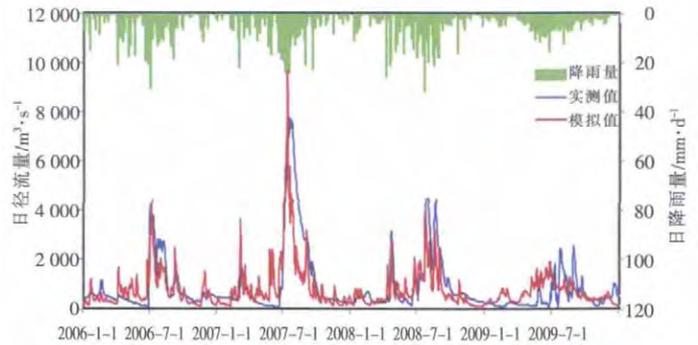


图 6 淮河流域验证期(2006~2009 年)日降雨、径流模拟与实测结果比较  
Fig.6 Comparison between the observed and simulated results of the daily rainfall-runoff simulation for the Huaihe River basin during the validation period (2006-2009)

表 2 中显示各时间尺度上验证期与率定期的确定性系数和相关性系数基本接近。具体来讲,验证期日、月时间尺度上确定性系数为 0.61、0.71,较率定期有所降低,相对误差较率定期减小 3%。这主要是由于 2009 年的模拟效果不理想引起的,图 6 可以看出 2009 年的模拟径流量与实测过程差值较大,据 2009 年淮河水资源公报显示,2009 年 7 月遭遇干旱,对淮河流域水量进行了人工调度,使实测值偏离了正常水文径流过程。

总体来讲,ESSI 分布式水文模型在淮河中上游地区具有良好的适用性,但仍存在不足和问题,经分析影响精度原因主要有以下 3 点:

- (1)土壤属性参数影响着土壤对水量的调蓄作用,

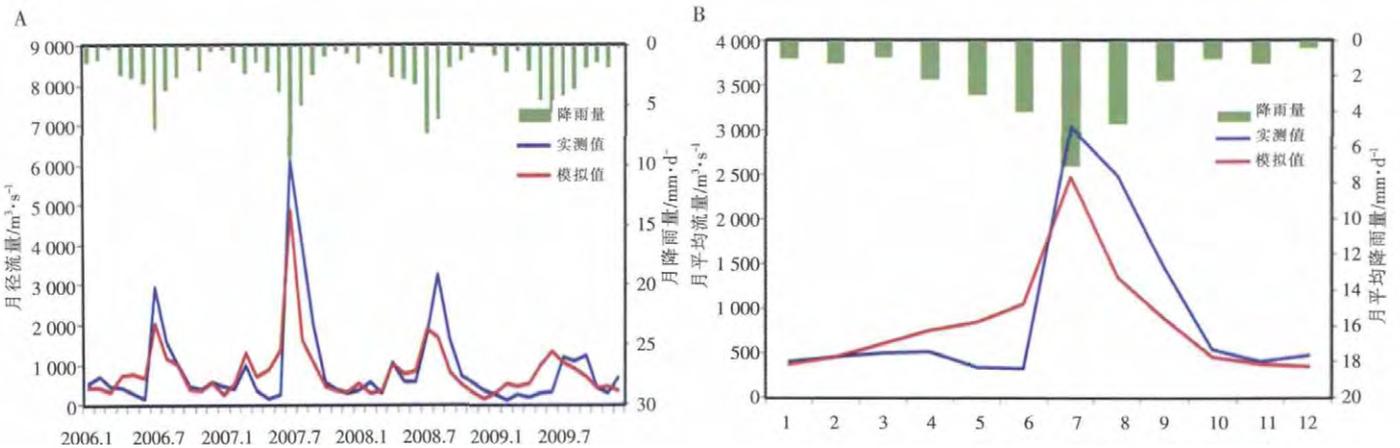


图 7 研究区流域验证期逐月流量(A)、月平均流量(B)与实测结果比较  
Fig.7 Comparison between the observed and simulated results of the monthly rainfall-runoff simulation(A) and monthly mean runoff simulation(B) for the Huaihe River basin during the validation period

是模型的重要参数之一。本文用的是 FAO 发布的土壤类型数据,土壤参比结果的精准度不确定。另外由于淮河流域面积较大,出水口所在的小柳巷站集水面积达到了  $12.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 整个流域内包含的土壤类型较多, 相同的土壤类型在不同地区的土种类型分布也不同, 仅棕壤一种类型在淮河流域就涉及到接近 20 种土种, 本文选取的是面积最大的土种来代表。ESSI 模型中根据土壤的分层参数动态计算每一层土壤对入渗水的调节, 由于选取的土种不同导致土壤参数差异, 土壤容重、下渗率、含水量等与实际情况存在误差, 最终影响到入渗水量的调蓄、土壤再分配<sup>[16]</sup>。从模拟的结果来看, 模型对降雨过程的响应比较敏感, 主要原因是流域土壤水对水量的调节不明显, 一个稍大的降雨过程就对应一个流量峰值过程。而在实际中土壤对入渗水量的调蓄作用, 当降雨量变化不大时, 流量过程应该比较平稳。土壤属性与实际情况的接近程度决定着土壤对水量调节的真实反映情况, 因此, 提高土壤参数的精度对模型模拟结果有重要影响。

(2) 闸坝对淮河流域自然水文情势的影响。在整个淮河流域上共建有各类水闸 5 427 座, 其中大、中型水闸 600 多座, 大中小型水库 5 378 座<sup>[17]</sup>, 总库容  $303 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占多年平均径流量的 51%。河道上的闸坝修建和修建对水循环、水量平衡及水文情势都有重要影响<sup>[18]</sup>, 主要表现在径流总量、水质、特征径流事件的规模、季节性以及变化的速率<sup>[19]</sup>。从径流模拟与实测结果对比来看, 实测径流要平缓很多, 在非汛期一些本应由较大降雨量引起的洪水过程消失, 汛期内的洪水历时要长。闸坝对自然水文情势的影响直接关系到水文站的径流量观测值, 张勇军<sup>[20]</sup>在淮河流域 29 座评估闸坝的 1990~2000 年的流量进行研究, 结果表明多年平均流域出口流量比无闸坝情况下减少了 2%, 非汛期减少了 5%, 这与模型模拟出的逐月流量与实测值相比的规律相同, 说明模型结果的合理性。

(3) ESSI 模型长时段降雨~径流模拟中需要给定日降雨时间长度, 降雨的时长决定雨强的大小, 对流域的产流类型的分布和数量的计算有重要影响。模型中给出一个确定的日降雨时长, 这样就形成生了降雨时间长度和汇流过程的均化作用, 但是在淮河流域这样大尺度流域面积内降雨量和时间长短分布不均匀, 弱化了超渗产流量在整个栅格产流中的贡献<sup>[22]</sup>, 影响了

产流类型在栅格中的分布, 最终影响到径流模拟结果的精度。

### 3.3 水文过程空间变化分析

ESSI 模型具有良好的可视化界面, 能够同步输出各水文中间变量, 显示水文模拟中的时空变化规律, 为参数率定和判断水文结果提供了可靠的支持。2002 年 7 月 24 日前后为一次较大的降雨过程, 图 8 显示了这一天的中间水文变量结果。

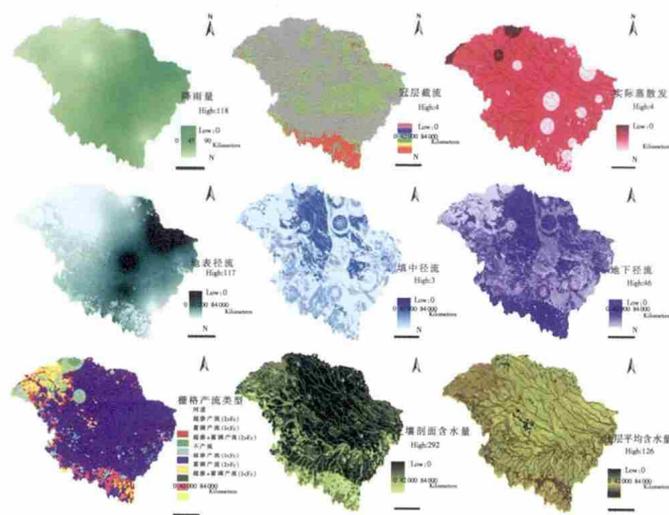


图 8 淮河流域 2002 年 7 月 24 日水文过程模拟结果空间分析  
Fig.8 Spatial distribution of the different hydrological simulation results for the Huaihe River basin on July 24, 2002

气象数据的空间离散选用的是反距离插值法, 可以看出得到的栅格面雨量呈现中心状态, 这与 IDW 插值方法的原理和已知点分布距离有关, 距离越近权重越大相应的降雨值越接近, 造成已知点附近的插值结果出现中心分布情况。冠层截留与植被类型紧密相关, 淮河流域平原占到 2/3, 以农田、耕地为主, 散落分布着落叶阔叶林和落叶针叶林; 而在西南部的丘陵地区植被相对稀疏, 对降雨的截留作用较小, ESSI 模型中输出的图层中基本上反映出此规律。蒸散发的分布与降雨呈现出负相关性, 降雨量越大的区域蒸散发越小, 这是因为蒸散发的计算采用互补相关法, 地表空气状态会直接影响潜在蒸散发, 当降雨量大时空气湿度大, 同时降低土壤和植被的蒸散发作用, 由于降雨的分布出现中心分布导致蒸散发的相应的圆形板块现象。

从地表径流与降雨量的空间分布来看, 两者呈现出极高的正相关性; 地下径流与壤中径流在平原

地区的分布趋势一致,但是在丘陵山区地带地下径流的比例要高于壤中径流。总量上来说,壤中径流量较少,地表径流最多,地下径流在丘陵地区站的比重较大。

在产流类型中,大部分处于前期土壤水蓄满状况,主要是因为处于雨季且之前有过降雨。超渗产流+蓄满产流类型占主要部分,在淮北和西南丘陵地区有不产流类型,与降雨量较小和前期土壤含水量较少有关,大部分补充到了地下径流中。从土壤剖面含水量图来看,剖面含水量多少的分布与产流类型中的蓄满状况分布极为接近,在降雨量较大的地方含水量高,说明外部供水对土壤含水量的变化有重要的影响;土层平均含水量的分布要比剖面含水量分布均匀,含水量较少的地区呈带状分布,除了降雨因素,还与地形、土壤类型有关,砂浆黑土、粗骨土对应的地带土层平均含水量较低。

综上所述,图8所显示的不同水文子过程和模拟结果的空间分布状况与淮河流域的客观规律相近,说明ESSI模型在描述水文过程中间变量的动态时空分布方面也具有较高的准确度。

#### 4 结论

本文将ESSI分布式水文模型应用到淮河流域,选取小柳巷水文站为出水口,利用实测水文资料对模型进行率定和验证,分别从时间尺度和空间尺度进行分析,研究结论如下:

(1)分别对率定期和验证期的模拟结果与实测对比得出,两者的水文过程规律和精度评价指标接近,说明模型参数的代表性和模型良好的稳定性。日模拟水文径流过程与实测径流曲线基本吻合,峰值出现时段一致。从月模拟流量和月平均模拟流量来看,模拟的结果呈现季节变化,在11、12、1、2月枯水时期模拟流量与实测值较接近或略偏小;从3~6月中水期模拟的流量要大于实测值,但是在7~10月丰水期模拟值要小于实测流量。不同时间尺度的精度评价来看,日时间尺度上,模拟的流量确定性系数达到0.65,相关性系数达到0.81;随着时间尺度的增大,模拟的精度也提高,模拟的月、年径流量确定性系数达到0.72、0.78,相关性系数达到0.87、0.99;相对误差率均为负值,说明模拟值小于实测值。从精度原因分析可以看出,除了模型本身的影响外,土壤参数、植被参数都是决定模拟精度大小的主要因素;另

外淮河流域内建有大量的闸坝,人为对水文情势的干扰作用强烈,这样的特殊性影响了模拟值与实测值之间的准确度。

(2)从2002年7月24日的模拟蒸散发、冠层截留、径流量分配、土壤含水量等变量的空间分布来看,模拟的空间分布形态与淮河流域的客观规律相近,表明ESSI模型对各水文过程具有合理的描述和表达,为水资源的时空动态变化规律研究提供良好的模拟平台,同时为参数率定和问题查找提供便捷。

参考文献:

- [1] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model[J]. *Journal of Hydrology*, 1969,(9):237-258
- [2] 何长高,董增川,陈卫宾. 流域水文模型研究综述[J]. *江西水利科技*, 2008,34(1):20-25. (HE Changgao, DONG Zengchuan, CHEN Weibin. Research process of basin hydrology model[J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2008,34(1):20-25. (in Chinese))
- [3] 李致家,张珂,姚成. 基于GIS的DEM和分布式水文模型的应用比较[J]. *水利学报*, 2006,37(8):1022-1028.(LI Zhijia, ZHANG Ke, YAO Cheng. Comparison of distributed geological models based on GIS technology and DEM [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006,37(8):1022-1028. (in Chinese))
- [4] ULLRICH A,VOLK M..Application of the soil and water assessment tool (SWAT)to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity [J]. *Agricultural Water Management*, 2009,40(7):1-11.
- [5] 张东,张万昌,朱利,等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J]. *地理科学*, 2005,25(4):434-440. (ZHANG Dong, ZHANG Wanchang, ZHU Li, et al. Improvement and application of SWAT—a physically based, distributed hydrological model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005,25(4):434-440. (in Chinese))
- [6] 康尔泗,程国栋,董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (KANG Ersi, CHENG Guodong, DONG Zengchuan. *Ice Water Resources and Runoff in Arid Area of Northwest China* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [7] Beven K J. How far can we go in distributed hydrological modeling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001,5(1):1-1.
- [8] 赵登忠. 基于ESSI分布式水文模型的遥感蒸散发同化研究 [D]. 南京大学, 2008. (ZHAO Dengzhong. *Assimilation of Remotely Sensed Evapotranspiration in the Distributed Hydrological Model ESSI* [D]. Nanjing University, 2008. (in Chinese))
- [9] 陈炯峰. 基于分布式水文模型的流域尺度土壤湿度遥感数据同化研究[D]. 南京大学, 2010. (CHEN Jiongeng. *Assimilation Study of Remotely Sensed Soil Moisture Based on the Distributed Hydrological Model at Watershed Scale* [D]. Nanjing University, 2010. (in Chinese))

- [10] 刘瑞娟. 分布式非点源污染模型研究与应用 [D]. 中国科学院研究生院, 2011. (LIU Ruijuan. Research and Application of Distributed Non-Point Source Pollution model [D]. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))
- [11] 张东. 基于渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型研究 [D]. 南京大学, 2006. (ZHANG Dong. Study of Distributed Hydrological Model with the Dynamic Integration of Infiltration Excess and Saturated Excess Water Yielding Mechanism [D]. Nanjing University, 2006. (in Chinese))
- [12] 许鹏坤. 雅鲁藏布江流域 05-10 年冰川及地下水量变化研究 [D]. 南京大学, 2013. (XU Pengkun. Study on Glacier and Groundwater Mass Changes of Yarlung Zangbo River Basin from 2005 to 2010 [D]. Nanjing University, 2013. (in Chinese))
- [13] 陈志诚, 龚子同, 张甘霖, 等. 不同尺度的中国土壤系统分类参比[J]. 土壤, 2004, 36(6): 584-595. (CHEN Zhicheng, GONG Zitong, ZHANG Ganlin, et al. Correlation of soil taxa between Chinese soil genetic classification and Chinese soil taxonomy on various scales [J]. Soil, 2004, 36(6): 584-595. (in Chinese))
- [14] 全国土壤办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. (The National Office of Soil. Chinese Soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. (in Chinese))
- [15] 胡巍巍. 蚌埠闸及上游闸坝对淮河自然水文情势的影响[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 1013-1018. (HU Weiwei. The influence on the natural hydrologic regimes of the Huaihe River dams by Bengbu sluice and its upstream dams [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 1013-1018. (in Chinese))
- [16] 付湘, 谭广明, 胡铁松. 土壤空间变异下田间降雨入渗率的分布特性[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 795-802. (FU Xiang, TAN Guangming, HU Tiesong. Characteristics of the infiltration rate distribution in special variable soil field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 795-802. (in Chinese))
- [17] 宁远, 钱敏, 王玉太. 淮河流域水利手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (NING Yuan, QIAN Min, WANG Yutai. The Huaihe Handbook of River Basin Water Conservancy [M]. Beijing: China Science Press, 2003. (in Chinese))
- [18] 董哲仁, 孙东亚. 生态水利工程原理与技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (DONG Zheren, SUN Dongya. The Principle and Technology of Ecological Water Conservancy Project [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [19] 戴志军, 李九发, 赵军凯, 等. 特枯 2006 年长江中下游径流特征及江湖库径流调节过程[J]. 地理科学, 2010, 4(30): 577-581. (DAI Zhijun, LI Jiufa, ZHAO Junkai, et al. Adjustment processes of runoff among river, lake and reservoir along mid-lower reaches of Yangzi River during 2006 extreme drought year [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 4(30): 577-581. (in Chinese))
- [20] 张永勇, 夏军, 程绪水, 等. 多闸坝流域水文环境效应研究及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (ZHANG Yongyong, XIA Jun, CHENG Xushui, et al. Study and Application of Hydrologic and Environmental Effects in the Highly Regulated River Basins [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2011. (in Chinese))

## Application of ESSI Distributed Hydrological Model in Huaihe River Basin

CHEN Zhimin<sup>1,2</sup>, ZHANG Wanchang<sup>2</sup>, YAN Chang-an<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Applied the ESSI distributed hydrological model, the rainfall runoff in different time scales and the spatial distributions were simulated and forested in the upper reaches of the Huaihe River above the Xiaoliuxiang Station. By choosing suitable model scenario, model calibration parameters were achieved from calibration period (2001~2004) and reused in validation the period from 2006 to 2009. It is found that the ESSI model has good applicability and correctly describes the hydrological processes in the study area. Meanwhile, the spatial distribution simulated from ESSI shows great conformity with the objective laws of basin, indicating ESSI model has reasonable description and expression for the hydrological process. Above all, the ESSI model provides a good simulation platform for researching spatial and temporal distribution of water resources.

**Key words:** ESSI distributed hydrological model; rainfall-runoff simulation; hydrologic processes; spatial and temporal distribution; Huaihe River Basin