

# 网格大小选择对大尺度分布式水文模型 水文过程模拟的影响

叶许春<sup>1,2</sup>, 张奇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:**以鄱阳湖信江流域为研究区,分析了网格大小选择对大尺度分布式水文模型水文过程模拟的影响。研究结果显示,在同样参数条件下,1、2和4 km这3种不同尺寸网格对模拟的总径流量影响较小,但网格大小显著地改变着模拟水流在地表径流和地下径流间的分配;不同网格的模型计算的实际蒸发量的差别不显著;大网格的模型计算的地下水补给量大。经过率定后的3种不同网格的模型均能较好地模拟流域的径流过程,但2 km网格模型模拟的总体效果要好于1 km网格模型和4 km网格模型。研究表明,对于分布式水文模型,网格的精细并不一定提高模型的模拟效果,一定精度空间数据的输入条件下,分布式水文模型存在一个合适的网格大小使得模型的模拟效果最佳。在流域水文模型的具体应用中,应考虑流域本身的尺度以及模拟的目的和精度要求,选择合适的网格大小,同时应结合模型机理,解释模拟结果。  
**关键词:** 分布式水文模型; 网格大小; 径流; 实际蒸散发; 地下水补给; 鄱阳湖流域  
**文献标识码:** B      **文章编号:** 1000-288X(2010)03-0112-05      **中图分类号:** P333.1

## Effects of Grid Size on Hydrological Process Modeling as a Distributed Hydrological Model at Large Scale

YE Xu-chun<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A grid-based distributed hydrological model (three different grid sizes: 1, 2, and 4 km) is used to study the impact of grid size on hydrological process modeling in a large catchment of Xinjiang River, China. Results from the study indicate that scaling of grid size absolutely affects the partition of water distribution between surface runoff and subsurface flow, with modeled base flow increasing obviously as grid size increases. Modeled annual stream flow shows a slight decrease as grid size increases. Scaling of grid size has no significant effect on actual evapotranspiration of the catchment, but water infiltration increases obviously when surface slope becomes flatter with a bigger grid size. After calibration, the three grid size models all have a well performance in modeling stream flow, but the 2 km grid size model performs better than the other two models. From this study, it can be concluded that fine resolution of grid size does not mean to improve the modeling accuracy in a distributed hydrological model and coarse resolution of grid sizes can be used for stream flow modeling, depending on watershed size and the level of accuracy required. For a specific resolution of soil data, there is an optimum grid size at which the model performs best.

**Keywords:** distributed hydrological model; grid size; stream flow; actual evapotranspiration; groundwater recharge; Poyang Lake catchment

分布式水文模型考虑了降雨、蒸发和下垫面条件的空间分布不均匀性,从而能够准确地模拟流域的水文过程<sup>[1]</sup>。在大尺度流域,降雨、蒸发和下垫面条件的空间分布不均匀性较大,水文过程模拟的准确性有

收稿日期:2009-09-07

修回日期:2009-12-21

资助项目:中国科学院知识创新工程重大项目“鄱阳湖流域水文过程与湖泊水量变化研究”(KZCX2-YW-337);国家自然科学基金“非点源氮迁移路径与源区识别的定量化研究”(40871026)

作者简介:叶许春(1982—),男(汉族),安徽省潜山县人,博士研究生,主要从事自然地理学方面的研究工作。E-mail: yxch2500@163.com。

通信作者:张奇(1966—),男(汉族),江苏省吴江县人,研究员,主要从事流域物质输移过程及其模拟研究工作。E-mail: qzhang@niglas.ac.cn。

赖于输入数据对流域特征的描述。然而,由于水文模型本身的非线性特性,水文过程通常对流域气候、土壤、地形以及植被的空间分布形式较为敏感<sup>[2]</sup>。对于那些基于网格的分布式水文模型,模型的运算效率及模拟结果的准确性往往受网格大小的选择和输入空间数据精度的影响。

分布式水文模型中,选择不同大小的网格离散流域空间将显著地影响流域地形、土壤以及植被的空间分布形态,从而影响对水文过程的准确模拟<sup>[3-4]</sup>。在实际应用过程中,人们对分布式水文模型网格大小的选择较为随意<sup>[5]</sup>,往往基于对流域的尺度、模拟精度的需求以及计算效率的考虑。空间或时间分辨率的大小会引起分布式水文模型模拟结果的不同,大的网格会造成空间信息的改变或丢失,从而影响对流域水文特征的模拟<sup>[6]</sup>。Hessel<sup>[7]</sup>, Kuo<sup>[8]</sup>的研究显示,当模型网格从5~100 m,和从10~600 m逐渐增大时,模拟的地表径流不断减小,而实际蒸散发则随网格的增大而增大。然而,对于分布式水文模型,网格的无限精细并不一定提高模型的模拟效果<sup>[9]</sup>,在一定精度空间数据的输入条件下,可能存在一个合适的网格大小使得模型的模拟效果最佳。Vázquez<sup>[10]</sup>在一小流域应用 MIKE—SHE 模型时发现,600 m 网格模型的模拟效果要好于300 m 网格和1 200 m 网格模型的模拟效果。Mo<sup>[12]</sup>应用 VIP 模型对黄土高原土壤蒸散发和作物产量的研究也显示,1 km 网格相对于250 m 和8 km 网格来说更适合于模型的应用。此外,MoIná<sup>[11]</sup>也曾表示,低精度的网格可用于大尺度流域降雨—径流关系的模拟。国内学者在 DEM 分辨率对流域地形特征和水文过程的影响的研究方面较为集中<sup>[12-13]</sup>,然而,对基于网格的分布式水文模型中网格大小对水文过程模拟结果的影响的研究深入不足。对于大尺度流域分布式水文模型,小网格的应用也意味着增加数据的前处理工作,同时也加大了模型的运算量,因此分析网格大小对水文过程模拟的影响,有利于增强对水文模型机理以及模拟结果对网格选择不确定性的认识。

## 1 研究区概况

信江流域位于鄱阳湖流域东南,是鄱阳湖5大入湖河流——信江水系所在区域。信江流域面积17 096 km<sup>2</sup>,流域北、东、南三面为低中山环绕,信江自东向西穿过,于北西方向注入鄱阳湖流。下游梅港站以上流域面积15 535 km<sup>2</sup>,梅港站实测多年平均径流578 m<sup>3</sup>/s。

信江流域属亚热带湿润气候区,多年平均降雨量

1 878 mm,多年平均蒸发量1 044 mm(1960—2005年间)。年内降雨分配不均,呈现明显的干、湿分明的特点。湿润季节一般是4—6月,受东南亚季风系统的影响,季风区前缘北移,区内降雨从7—9月开始迅速减少。9月以后,流域进入干季状态,一直持续到12月。流域年平均温度18℃,7月平均最高气温37℃,1月份平均最低气温-3℃。

## 2 数据与方法

### 2.1 WATLAC 模型

WATLAC 模型模拟在降雨和蒸发驱动下,流域地表、地下径流和土壤含水量的变化。具体过程包括,植被拦截、土壤蓄水、地表径流、土壤对地下水的补给、饱和地下水运动。模型包含地表、地下径流2个子模型。地表径流模拟采用基于网格单元的空间离散,依据地形高程和水系计算汇流路径。地下水运动采用有限差分网格离散空间,使用 MODFLOW 并作适当修改,使其与地表径流模型耦合。流域的空间非均匀性(地形、降雨、蒸发、土壤类型、土地利用等)由单元网格离散并模拟。模型计算过程中,降雨经植被截留后到达地面进入非饱和土壤水层,不能渗入地下的雨量,成为地表径流。模型根据给定的潜在蒸发量计算实际蒸发量,由植被截留蒸发、地面蓄水蒸发和土壤水蒸散发组成。土壤水一部分消耗于蒸发,另一部分下渗为地下水补给量,该补给量假设为与土壤含水量成正比。地表产流量通过汇流路径进入河道,再采用曼宁公式演算河道径流。基流由地下水模拟及其与河道的水量交换计算获得,具体由 MODFLOW 及其河流软件包(RIV Package)实现。

该模型已经在太湖西苕溪<sup>[14]</sup>、抚仙湖<sup>[15]</sup>、鄱阳湖<sup>[16-17]</sup>等流域开展了应用研究,取得了较好的模拟效果。模型具体原理及过程可参阅文献<sup>[14-18]</sup>。

### 2.2 基础数据

模型所需数据主要有气象数据、地形数据、土壤类型和土地利用/覆被数据3类。日降雨和气温数据主要采用流域内鹰潭(28.15°N, 117.02°E);贵溪(28.18°N, 117.13°E);铅山(28.19°N, 117.42°E);上饶(28.27°N, 117.59°E);玉山(28.41°N, 118.15°E)等5个国家气象站的逐日观测资料,具体包括日最低、最高气温,逐日降雨、风速和湿度。模型的潜在蒸发量采用 P—M 公式进行计算。地形数据由长江流域1:25万地形等高线图插值生成 DEM 数据,网格大小为100 m。土地利用类型数据由2000年江西省1:100万土地利用图片数字化得到,并根据土地利用的一级分类,最终划分为耕地、有林地、灌木林、

草地、城镇等 6 种土地利用类型,各土地利用所占流域面积百分比从 0.1% 到 46.7% 不等。土壤数据来源于江西省土地管理局 1990 年土壤调查结果,数据分辨率为 1:300 万,根据国家土壤分类标准最终综合划分成红壤、红壤性土、黄壤、黄棕壤及紫色土 5 种土类,各土类所占流域面积百分比从 1.3% 到 55.8% 不等。由于地下水数据资料的缺乏,在模型中采用垂向一维均质单元模拟地下水,该地下水的模拟只为提供河道基流,在模型中作了简单处理,含水层饱和渗透系数 ( $K$ ) 和给水度 ( $s$ ) 等数据在模型中采取率定的方法确定。

### 2.3 研究方案及评价指标

刘健和张奇<sup>[16]</sup>应用 WATLAC 模型建立了 4 km 网格尺度的鄱阳湖赣江流域分布式水文模型,具有一定的模拟精度。本文以此网格尺度为上限,向下依次选取 2 km, 1 km 网格作为对比,分析不同网格尺度对水文过程模拟的影响。研究方案主要分以下两步:(1) 首先建立一个 2 km 网格的流域水文模型,并对模型进行率定和验证,然后将率定的 2 km 网格模型的有效参数分别应用于一个小网格模型——1 km 网格模型,和一个更大的网格模型——4 km 网格模型。基于同样的参数条件,从而分析不同的网格大小对产流量、实际蒸散发以及地下水补给等水文过程模拟的影响。(2) 基于建立的 3 个不同网格的模型,分别进行率定和验证,通过对不同网格模型模拟效果的评价,从而分析出适应模型的最佳网格大小。

模型率定采用手动调参法,在模型率定之前,使用滤波法将观测径流分割成地表径流和基流两部分,模型率定的标准是使模拟的地表、地下径流的相对误差控制在 5% 以内。模型以日径流输出为评价对象,选用 1994—1998 年梅港站径流数据进行模型的率定,1999—2003 年为模型验证期。模型模拟结果的评价指标有百分比误差 ( $P_B$ ),以及 Nash—Sutcliffe 效率系数 ( $E_{ns}$ ),具体表达式为:

$$P_B = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

式中:  $P$ ——模拟值;  $O$ ——观测值;  $\bar{O}$ ——观测平均值。

## 3 结果分析

### 3.1 网格大小对产流量的影响

观测的河道径流来自地表径流和基流两部分,采用基流分割程序——数字滤波法<sup>[19]</sup>对模拟期 1994—2003 年梅港站日径流过程进行分析,结果显示总径

流中约 38% 来地下基流。WATLAC 模型采用垂向一维均质单元模拟地下水,该模拟的地下水部分是河道基流的主要来源。

表 1 显示了不同网格模型模拟的地表径流、基流和河道总径流的差异及其与实测径流的对比。由于各网格模型是基于相同的参数条件下,其模拟结果的差异反映出网格大小对径流的影响。

表 1 相同参数条件下不同网格模型对多年平均径流量模拟结果的差异 (1994—2003 年)

项目	地表径流		基流		总径流	
	模拟值/ mm	误差/ %	模拟值/ mm	误差/ %	模拟值/ mm	误差/ %
1 km 网格	997.73	16.5	378.64	-27.9	1376.37	-0.4
2 km 网格	826.43	-3.5	538.00	2.5	1364.42	-1.2
4 km 网格	585.64	-31.6	712.89	35.8	1298.53	-6.0
实测值	856.41	—	524.90	—	1381.31	—

由表 1 可以看出,总径流量随网格的增大呈现轻微的减小趋势,1 km 网格模型模拟的径流量略大于 2 km 和 4 km 模型,其中 1 km 网格模型与 2 km 网格模型模拟的多年平均径流的差别非常小,这与 Hessel<sup>[7]</sup>, Kuo<sup>[8]</sup> 的研究显示模拟的径流随网格的减小而增大的结论相一致。模型模拟的基流则随网格的增大,其增加趋势十分显著,地表径流则相反。

图 1 显示了基流所占径流总量百分比随网格的增大呈直线的增加趋势,1 km 网格模型模拟的基流约占总径流的 27%, 2 km 网格模型模拟的基流约占总径流的 39%, 而 4 km 网格模型模拟的基流则达到总径流的 55% 左右。

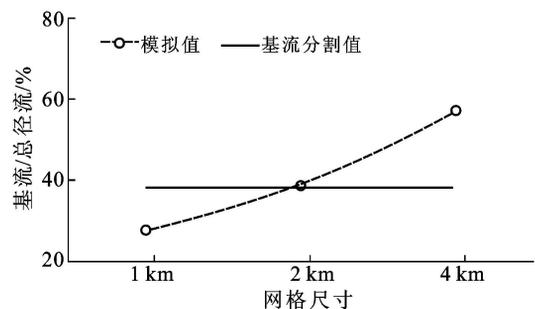


图 1 不同网格条件下模型模拟的基流比重的差异

以上分析表明网格大小对分布式水文模型模拟的总径流量有一定的影响,对模拟的地表径流和地下径流的影响非常显著。网格大小显著地改变地表径流和地下径流间的分配比例,随着网格的增大,有较多的水流入渗地下并以基流的形式补给河道,而以地表径流的形式汇入河道的水量减小。

### 3.2 网格大小对实际蒸发的影响

蒸发过程是流域地表水、土壤水损失水量的主要机制,WA TLAC 模型计算的蒸发量,由植被截留蒸发、地面蓄水蒸发和土壤水蒸散发组成。模拟结果显示模拟期内不同网格模型模拟的月蒸散发量过程几乎一致。1,2 和 4 km 网格模型计算的月平均蒸发量分别为 52.73,52.26 和 53.58 mm。不同网格条件下,模型模拟的蒸发量差别微小,表明网格大小对模型模拟的实际蒸发量影响较小。

网格大小对蒸散发的影响较为复杂,因为从小网格重采样生成的大网格数据会造成土壤、植被等空间数据信息的均化或丢失,不同网格的模型对流域的离散在一定程度上会导致土壤、植被等数据空间分布的差异,影响蒸散发过程<sup>[20]</sup>,如 Hessel<sup>[7]</sup>,Kuo<sup>[8]</sup>的研究表明模型计算的蒸散发随网格的减小而减小。实际应用中,往往由于不同网格离散的土壤、植被的总体特征在流域尺度上并不能表现出较大的差异,以及不同模型对植被截流、土壤蒸散发等计算方法的差异也使得模型对实际蒸散发的模拟结果存在很大的不确定性。在信江流域中,不同网格的 WA TLAC 模型计算的蒸发量的差别不显著。

### 3.3 网格大小对地下水补给的影响

土壤水一部分消耗于蒸发,另一部分下渗为地下水补给量,地下水补给量的绝大部分又以基流的形式补给河道径流。前面对产流量的分析中,指出网格大小显著地改变着水流在地表径流和地下径流间的分配。随着网格的增大,有较多的水流入渗地下并以基流的形式补给河道,在很大程度上,网格大小对基流的影响也正反映了其对地下水补给的差异。图 2 显示了不同网格模型模拟的月地下水补给量的变化过程。由图 2 可以看出,不同网格模型模拟的地下水补给量的差别非常明显,在相同的参数条件下,网格越大,模型计算的地下水补给量就越大。统计显示 1,2 和 4 km 网格模型计算的月平均地下水补给量分别为 27.63,45.08 和 69.46 mm。

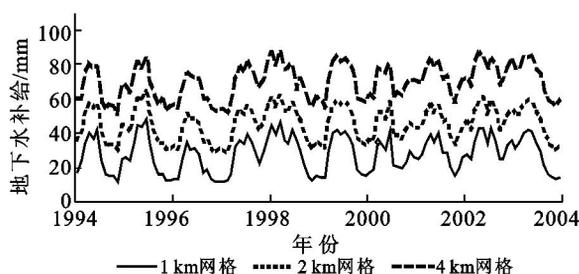


图 2 相同参数条件下不同网格模型模拟的月地下水补给量差异

影响地下水补给量的主要因素有降雨的历时、到达地表的净雨量以及土壤本身的入渗能力,在相同的网格条件下,流域总的降雨量及历时一定,其到达地表的净雨量差异很小,因此土壤的入渗力是影响地下水补给的主导因素。大量的研究表明,DEM 的分辨率对流域模拟有一定的影响。由不同分辨率 DEM 得出的流域面积、河网结构、高程、河道长度等在大体上是一致的,但是由不同分辨率 DEM 提取的坡度差别较大<sup>[11-13]</sup>。在一定的土壤数据的条件下,土壤入渗能力的差别主要来自于不同网格模型对流域地形坡度离散后的差异。表 2 显示了 3 种网格模型提取的流域特征参数及其与原始 100 mDEM 数据的差别。由表 2 可知,不同网格模型所提取的流域面积、高程差别不大,而坡度的差异显著。网格越大,模型中提取的流域最大坡度、平均坡度等越小,流域地形就越显平坦。坡度对地下水补给的影响主要表现在,坡度的减小有利于延长地表径流的汇流时间,增大地表水的入渗速率,从而改变着水流在地表径流和地下径流的分配比例。

表 2 不同网格模型提取的流域特征参数

网格尺寸	流域面积/ km <sup>2</sup>	高程/m		坡度/(°)			
		最大值	平均值	标准偏差	最大	平均	标准偏差
100 m	17 096.2	178.92	269.77	300.92	66.19	8.32	9.74
1 km	17 081.2	100.12	259.56	277.59	24.97	3.62	3.62
2 km	17 072.1	981.82	259.34	277.16	12.43	1.83	2.13
4 km	17 104.1	922.89	259.90	278.71	8.19	1.14	1.28

### 3.4 不同网格模型率定结果的比较

模型的率定是对模型模拟结果的改进,最大限度调整模拟结果与实测数据的吻合程度。分布式水文模型参数的率定与模型本身网格大小有关,Vázquez 等<sup>[10]</sup>对 MIKE—SHE 模型的应用研究表明,不同网格的模型其率定的有效参数与网格大小的选择有关,同样,Braun 等<sup>[21]</sup>指出,当模型从小网格应用到大网格时,模型参数需要重新率定。

分别对研究区的 3 个不同网格模型进行率定,对梅港站日径流过程的模拟效果见表 3。从表 3 中的模型模拟效果的评价指标来看,模型率定后,3 种网格的模型对梅港站日径流过程的模拟效果均较好,验证期内 Nash—Sutcliffe 效率系数在 0.84~0.89 之间。模型从 2 km 网格应用到 4 km 网格时,模型对流域空间特征的刻画变的粗糙,模型模拟的效果相对变差。当模型从 2 km 网格应用到 1 km 网格时,模型对流域空间特征的刻画将更为精细,然而模型模拟

的效果并未表现出相应的提高。1 km 网格模型 Nash—Sutcliffe 效率系数为 0.87, 小于 2 km 模型的模拟结果。由此可知, 2 km 网格模型对梅港站日径流过程的模拟效果相对要好 ( $E_{rs} = 0.89$ )。

表 3 不同网格模型对梅港站日径流过程的模拟效果统计

网格 尺寸	率定期(1994—1998年)		验证期(1999—2003年)	
	$P_B / \%$	$E_{rs}$	$P_B / \%$	$E_{rs}$
1 km	- 6.88	0.91	- 0.37	0.87
2 km	- 4.31	0.92	3.09	0.89
4 km	- 4.24	0.91	4.86	0.84

以上分析表明以下事实。(1) 不同网格模型对流域物理属性的刻画上有较大的差别, 依目标而定的模型率定能最大限度地模糊这种差别对水文过程模拟的影响, 使得不同网格的模型均能获得较好的模拟结果; (2) 尽管小网格的模型更能真实地反映流域空间特征, 但对于分布式水文模型, 网格的无限精细并不一定提高模型的模拟效果, 大网格的模型可用于模拟流域的水文过程; (3) 对于特定的流域, 在一定精度空间数据的输入条件下, 存在一个合适的网格大小使得模型的模拟效果最佳。

## 4 结论

本文以鄱阳湖信江流域为研究区, 分析了网格大小对大尺度分布式水文模型水文过程模拟的影响。结果表明, 在同样参数条件下, 网格大小对分布式水文模型模拟的总径流量影响较小, 但网格大小显著地改变着水流在地表径流和地下径流间的分配; 信江流域中, 不同网格的 WATLAC 模型计算的实际蒸发量的差别不显著; 在相同的参数条件下, 网格越大, 模型计算的地下水补给量就越大。此外, 通过对不同网格模型的分别率定, 结果显示, 2 km 网格的模型模拟效果略好, 但 3 种不同网格的模型均能较好地模拟流域的径流过程。

分布式水文模型网格大小的选择影响着分布式水文模型的模拟精度和计算效率, 小网格的分布式水文模型无疑更能真实地反映流域空间特征, 但其对输入数据的要求更高。高精度的空间数据会增加数据的前处理工作, 并且降低了水文模型的计算效率, 在大尺度流域的实际应用中不太实用。对大流域的水文模拟, 杨大文<sup>[22]</sup>等建立了 10 km 网格尺度的黄河流域分布式水文模型, 取得了较好的模拟效果; 刘健和张奇<sup>[16]</sup>采用 4 km 网格建立了赣江流域分布式水文模型, 具有一定的模拟精度; 而对于 1, 2 km 等较大网格的应用较为普遍。因此, 在满足一定模拟精度

条件下, 大网格的模型可用于模拟流域的水文过程, 这可能与大尺度流域水文过程对小范围(网格)内部的水文响应较小有关; 不同水文模型的机理中对一些水文过程的简化、概化等使得模型对网格大小的敏感性降低; 另外, 依目标而定的模型率定能很大程度上模糊网格差别对水文过程模拟的影响。在流域水文模型的具体应用中, 应充分考虑流域本身的尺度以及模拟的目的和精度要求, 选择合适的网格大小, 同时应结合模型机理, 解释模拟结果。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张金存, 芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法评述[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 286-292.
- [2] Mo X G, Liu S X, Chen D, et al. Grid-size effects on estimation of evapotranspiration and gross primary production over a large Loess Plateau basin, China[J]. Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologique, 2009, 54(1): 160-173.
- [3] Xu J, Yan Y. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 219-232.
- [4] Yang D, Herath S, Musiak K. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation [J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 2085-2099.
- [5] Jetten V, Govers G, Hessel R. Erosion models: quality of spatial predictions [J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 887-900.
- [6] Schoorl J M, Sonneveld M P W, Veldkamp A. Three-dimensional landscape process modeling: the effect of DEM resolution [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 25: 1025-1034.
- [7] Rudi Hessel. Effects of grid cell size and time step length on simulation results of the Limburg soil erosion mode 1 (LISEM). Hydrological Processes, 2005, 19: 3037-3049.
- [8] Kuo W, Steenhuis T S, McCulloch C E, et al. Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model [J]. Water Resources Research, 1999, 35: 3419-3428.
- [9] 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.
- [10] Vázquez R F, Feyen L, Feyen J, et al. Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code [J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 355-372.

- 文响应模拟:以太行山八一水库流域为例[J]. 节水灌溉, 2008(3):19-23.
- [13] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2):123-131.
- [14] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):133-137.
- [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] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2):238-242.
- [17] Popov E G. Gidrologicheskie Prognozy (Hydrological Forecasts) [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979:126-135.
- [18] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6):88-93.
- [19] 胡淑萍. 北京山区典型流域防护林体系对位配置研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008:214-222.
- [20] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5):1169-1188.

(上接第 116 页)

- [11] Molnár, Julien P Y, ASCE M. Grid-Size Effects on Surface Runoff Modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2000, 5(1):8-16.
- [12] 任希岩, 张雪松, 郝芳华, 等. DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1):1-4.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 径流模拟对 DEM 分辨率的敏感性分析[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1):32-35.
- [14] Zhang Q, Li L J. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China [J]. Quaternary International, 2009, 208(1/2):102-108.
- [15] 张奇. 湖泊集水域地表—地下径流联合模拟[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5):1-10.
- [16] 刘健, 张奇. 一个新的分布式水文模型在鄱阳湖赣江流域的验证[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(1):20-27.
- [17] 刘健, 张奇, 左海军, 等. 鄱阳湖流域径流模型[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4):469-478.
- [18] Zhang Q, Werner A D. Integrated surface-subsurface modeling of Fuxianhu Lake catchment, Southwest China [J]. Water Resources Management, 2009, DOI 10.1007/s11269-008-9377.
- [19] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2):411-424.
- [20] El Maayar M, Chen J M. Spatial scaling of evapotranspiration as affected by heterogeneities in vegetation, topography, and soil texture [J]. Remote Sensing Environment, 2006, 102:33-51.
- [21] Braun P, Molnar T, Kleeberg H B. The problem of scaling in grid-related hydrological process modelling [J]. Hydrological Processes, 1997, 11:1219-1230.
- [22] 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.