

# 赣江下游平原圩区水文过程模拟

苏保林<sup>1</sup>, 罗运祥<sup>1</sup>, 陈宏文<sup>2</sup>, 万禀颖<sup>2</sup>, 王涛<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 2. 江西省环境保护科学研究院, 南昌 330029)

**摘要:** 不同于山区丘陵地区, 平原圩区地形平坦, 河网交错, 水文过程复杂不确定, 且缺乏有效的水文观测数据, 因此 SWAT 模型的构建和应用受到较大的限制。以赣江下游平原圩区蒋巷联圩为例, 在充分调查研究区水文过程的基础上, 结合人工干预技术, 经过电排站出口和河道概化、汇水区划分和子流域边界修正, 完成了研究区 SWAT 模型子流域概化; 以 2006 年-2008 年圩区电排站的抽水量数据为基础, 进行了圩区水文过程模拟。结果表明, 各汇水区率定期的决定系数  $R^2$  达到 0.63 以上, Nash Sutcliffe 效率系数  $NSE$  达到 0.70 以上; 验证期  $R^2$  达到 0.70 以上,  $NSE$  达到 0.79 以上。采用人工干预的方法能使 SWAT 模型子流域划分更加符合实际, 使 SWAT 模型能够应用于平原圩区, 并达到较好的水文过程模拟效果。

**关键词:** SWAT 模型; 子流域概化; 水量模拟; 平原圩区; 赣江

**中图分类号:** P343.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0039-05

## Modeling of Hydrological Processes in Lower Plain Polder of the Ganjiang River

SU Bao lin<sup>1</sup>, LUO Yun xiang<sup>1</sup>, CHEN Hong wen<sup>2</sup>, WAN Bing hao<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Jiangxi Academy of Environmental Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** Unlike the mountain and highland area, the plain polder area has flat topography and complicated river network, thus the hydrologic processes is uncertain and the effective hydrological data are limited, thereby affecting the development and application of SWAT model. In this paper, the Jiangxiang polder of the lower Ganjiang River was selected as the case study. Through the investigation of the hydrogeological conditions of the study area and artificial intervention technology, the sub-basin delineation based on SWAT model was obtained from the generalization of the outlet of electrical pumping station and river course, division of drainage area, and modification of boundary conditions of the sub-watershed. The hydrologic processes of the polder area were simulated based on the pumpage data of the electrical pumping station between 2006 and 2008. The results showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash Sutcliffe coefficient ( $NSE$ ) in each drainage area reach 0.63 and 0.70, respectively, during the model calibration period, and  $R^2$  and  $NSE$  reach 0.70 and 0.79, respectively, during the model validation period. The sub-basin delineation results were more reasonable using the artificial intervention technology, therefore the SWAT model was applicable for the simulation of hydrological processes in the polder area.

**Key words:** SWAT model; subbasin delineation; hydrologic modeling; polder area; Ganjiang River

大江大河的中下游及滨湖地区通常地势平坦低洼, 容易遭受洪涝灾害。为保证生产生活, 通常在低洼区域周围建有圩堤, 形成圩区或联圩。由于圩堤的存在, 使得圩区与外部自然水体的水力联系受到限制<sup>[1]</sup>。圩区内河道纵横交错, 组成复杂的水网系统。同时在圩区内河道末端常设闸坝和泵站, 水流去向在很大程度上受到人工控制, 与外界水力联系十分复杂<sup>[2]</sup>。我国平原圩区大多为农业、经济均比较发达

的地区, 也是农业非点源污染和村镇生活污染的重点控制区域<sup>[3]</sup>, 对圩区的水文过程的模拟和分析也将有助于研究平原圩区各类污染物产生和迁移转化过程。

分布式水文模型能够明确地解释过程、输入、边界条件和系统特征的空间差异, 综合考虑多种复杂的下垫面条件和管理措施<sup>[4,5]</sup>。SAWT 模型 (Soil and Water Assessment Tools) 是一个空间分布式、连续模拟的流域尺度模型, 可预

收稿日期: 2012-11-21    修回日期: 2012-12-10    网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1128.010.html>

基金项目: 国家“十一五”科技重大专项“水体污染控制与治理”项目课题 (2009ZX07526-005); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 苏保林(1965-), 男, 云南安宁人, 副教授, 博士, 主要从事水环境系统分析、非点源污染过程研究。E-mail: subl@bnu.edu.cn

测具有各种土壤、土地利用和管理条件的复杂流域内土地管理措施对水量、泥沙和水质过程的长期影响<sup>[6]</sup>。目前, SWAT 模型被集成到了地理信息系统(GIS)中,能够整合包括土壤、土地覆盖、气象和地形特征等各种空间环境数据<sup>[7]</sup>。迄今为止, SWAT 模型的有效性已经得到了国内外许多研究项目的证明,模型被广泛应用于不同尺度流域的研究项目中,研究内容涉及流域的水量平衡、河流流量预测和非点源污染控制评价等诸多方面<sup>[8-10]</sup>。国内外很多研究者曾把 SWAT 模型应用到平原区或部分含有平原区的流域,并就流域特征提取等模型应用问题进行了讨论<sup>[11-13]</sup>,但针对平原圩区的研究较少。本研究旨在探究 SWAT 模型在平原圩区进行水文过程模拟的适用性,并对模型构建和应用中存在的问题进行讨论。

## 1 平原圩区水文过程与建模难点

### 1.1 水文过程

平原圩区地势平坦,没有明确的坡面产汇流特征。为了保证农业生产和农村生活不受洪涝灾害影响,平原圩区周围通常都建有堤坝,阻碍了径流自排进入圩区外干流水体,使得区域内和干流的水力联系发生改变。如图 1 所示,圩区内产生的径流首先通过小的沟渠汇集到相对低洼的干渠或蓄水池塘,但由于圩堤和闸坝的存在,产生的径流并不能直接的汇到干流,而是暂时的储存在干渠或池塘中。如值汛期,干流的水位通常高于圩区内的水位,使得圩区内产生的径流不能自排。当圩区内蓄水体水位上升到一定高度时,为避免造成洪涝灾害,将通过电排站水泵的提升把圩区内多余的水量排入干流。这些水利工程措施完全改变了自然的汇流过程。

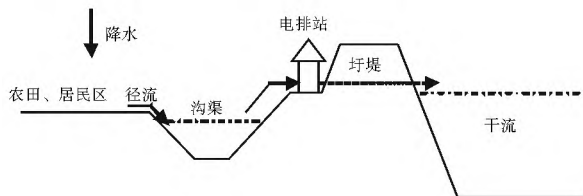


图 1 平原圩区主要水文过程示意

Fig. 1 The main hydrologic processes in the plain polder area

### 1.2 建模难点

平原圩区的地形地貌、气候等特征有别于山区丘陵地区,产汇流过程较为复杂,加之人类活动影响较大,使得自然的水文过程发生改变。构建平原圩区 SWAT 模型并正确模拟水文过程,需要对圩区水文过程有充分的认识。

#### 1.2.1 SWAT 模型子流域概化困难

基于数字高程模型(DEM)提取流域水文汇流关系是构建 SWAT 模型的关键步骤。平原圩区地势平坦,汇流关系复杂,使得 SWAT 模型子流域划分和概化常遇到如下问题:

- (1) 基于 DEM 提取的河道和汇水子流域与实际不相符合;
- (2) 河道常分叉或呈网状,使 SWAT 模型无法识别;
- (3) 圩堤、闸坝等水利工程影响汇流过程。

#### 1.2.2 缺乏水文观测数据

圩区内渠道众多,通常没有水文观测站点进行连续的流

量监测,缺乏可进行模型参数率定和验证的流量数据。由于圩区地势比较平坦,周围布有圩堤,区内产生的径流不能自然的通过流域出口排出,而是首先通过渠道汇集到电排站,然后通过电排站人工控制其排出,因此电排站就相当于流域出口。在进行参数率定和验证时,可将各电排站排水流量数据与模拟流量进行比较。由于电排站在运行过程中不记录流量数据,因此只能通过实地调查收集各电排站用电量和电费数据,再推算得到排水量数据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

赣江下游蒋巷联圩(见图 2)是江西省鄱阳湖区重点堤防之一,东临鄱阳湖、西接南昌城市郊,地势低洼,四面环水,被赣江南、中支流环抱而过,四周建有圩堤,形成闭合的区域,是平原圩区的典型代表。蒋巷联圩东西长 39 km,南北宽 4~6 km,圩内面积 149.9 km<sup>2</sup>,防洪堤线总长 95.1 km。整个蒋巷联圩由主要圩堤分为蒋巷内圩(圩堤线长 59.6 km)和黄湖蓄滞洪区(堤线长 35.5 km)两部分,其中蒋巷内圩又被较小的一般圩堤分割成三部分。各部分之间虽有渠道相连接,但渠道之间常有水闸相隔,通过实际调查发现各部分内圩之间水力联系较少。联圩土地利用类型以农业用地为主(90%),土壤类型以水稻土为主(97%)。

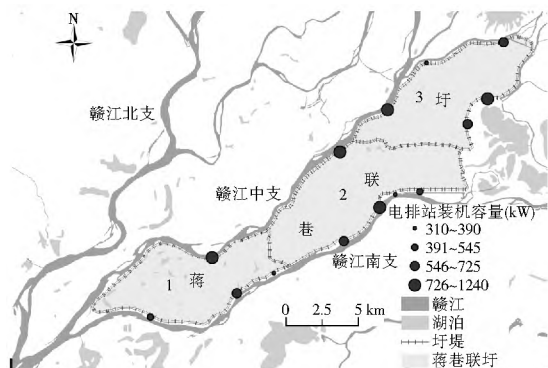


图 2 蒋巷联圩在赣江下游的位置

Fig. 2 Location of Jiangxiang polder in the lower Ganjiang river

### 2.2 基础数据

构建 SWAT 模型所需的输入数据包括空间数据和属性数据。空间数据主要包括 1:250 000 数字高程模型(DEM)、1:100 000 土地利用和 1:1 000 000 土壤分布图,研究区 1:50 000 实际电子河系图;属性数据包括南昌气象站 1980 年-2009 年三十年的气象数据、蒋巷联圩周边楼前、蒋埠和康山三个雨量站 2006 年-2008 年三年的日降水数据;蒋巷联圩主要电排站 2006 年-2008 年三年由用电量推算的月抽水量数据。

### 2.3 子流域概化

针对平原圩区 SWAT 模型子流域概化主要存在的问题,研究提出了相应解决方案:(1)采用基于高程值的“Burn in”方法对原始 DEM 进行修正以及人工定义河道和子流域的方法来解决流域提取失真的问题;(2)采用对分叉和网状河道进行合理概化的方式来解决分叉和网状河流的问题;

(3) 采用同时基于 DEM 和圩堤分布划定子流域的方法解决水利工程对研究区域汇流过程的影响。

### 2.3.1 出口和河道概化

由于闸坝和圩堤的存在,圩区内产生的径流并不能直接从流域出口流出,而是暂时的储存在干渠或池塘中。当水位上升到一定程度时,再通过电排站人为的把圩区内多余的水量排出。因此,每个电排站相当于一个流域出口。而蒋巷联圩电排站众多,需要对电排站进行筛选、合并。筛选时遵循以下三个原则:(1)装机容量大,表征电排站的规模,即潜在的抽水能力大;(2)多年平均排水量大,能表征电排站的实际运行情况,即实际抽水量多;(3)位置具有代表性,所选的电排站应能很好的控制周边排涝,且各站空间分布尽量分散。综合以上三条原则,最后选定了 6 个电排站,并概化为为圩区的 6 个出口(图 3)。

平原圩区地势平坦,仅仅基于研究区 DEM 数据提取出的河道与实际河道几乎无法匹配。而圩区内水系发达,结构复杂,需要对其进行概化以便 SWAT 模型更好地识别和简化计算。另外,经过出口概化后,需要将原本流向较小电排站的河流概化到邻近筛选出来的较大电排站出口。基于研究区 1:50 000 电子河系数据并结合实地调查,对主干河道进行概化修正,结果如图 3 所示。



图 3 子流域和多汇水出口概化结果

Fig. 3 The generalization of sub-basin delineation and multi outlet in the drainage area

### 2.3.2 汇水区和子流域边界概化

平原圩区大量分布的圩堤闸坝使得自然的汇流过程受到限制。而由于 DEM 精度及“噪声”的影响,使得这些因素不能完全地反映到 DEM 中<sup>[4]</sup>,因此在划分子流域边界时,不能单纯依靠基于 DEM 提取的结果,而还应该根据实际情况,按照圩堤和闸坝的分布划分子流域。蒋巷联圩四面环水,不但周围建有圩堤,内部还分布着大大小小的圩堤,把整个联圩主要分为三部分,如图 2 所示。每部分之间虽有渠道相连接,但渠道之间常有水闸相隔,实际调查发现各部分间水力联系较少。从而可将整个联圩划分为三个相对独立的汇水区(图 2),并按照 SWAT 模拟需求细化为 40 个子流域(图 3)。

利用模型的“Burn in”功能,导入概化的主干河道,基于 1:250 000 DEM 数据提取河道和子流域。此时由模型提取出的河道和子流域边界,特别是圩区三大汇水区的边界,与实际还有一定的差距,需要在 ArcGIS 中进行修正,结果如图

3 所示。由于圩堤以内区域均汇流进入圩区内部水体,因此修正后的子流域边界与整个圩堤外边界完全保持一致。

### 2.4 HRU 划分

水文响应单元(HRU, Hydrologic Response Unit)划分可以选择每个 HRU 中存在单一土地利用、土壤和坡度的组合,并可以通过调整其百分比阈值来控制生成的 HRU 的数量。由于案例研究区较小,且土地利用类型、土壤类型种类较少,坡度差异不大,故将三者的比例阈值设置得较小(10%)以生成更多数量的 HRU,最后划分为 230 个 HRU。

## 3 模拟结果与讨论

影响 SWAT 模型水量模拟的参数较多,基于相关参数敏感性分析文献<sup>[15-16]</sup>,确定以下几个参数进行重点分析和调整:径流曲线数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、植被蒸发补偿系数(EPCO)、土壤有效含水量(SOL\_AWC)等参数,主要参数的取值见表 1。

表 1 主要参数的值域及取值

Table 1 The ranges and calibrated values of major parameters

序号	参数代码	参数含义	参数值域	参数取值
1	CN2	径流曲线数	0~100	38~59
2	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.90~0.95
3	SOL_AWC	土壤有效含水量	0~1	0.03~0.15
4	EPCO	植物蒸发补偿系数	0~1	0.15~0.2

用 2006 年-2007 年两年的数据进行模型参数率定,2008 年的数据进行模型验证。参数的率定过程遵循先调整水量平衡再调整过程匹配的原则。采用 Nash Sutcliffe 效率系数(NSE)、决定系数( $R^2$ )评价模拟结果。Nash Sutcliffe 效率系数 NSE 用于衡量模型模拟值与观测值之间的匹配程度,该值越接近于 1,表示模拟值越接近观测值。决定系数  $R^2$  为相关系数的平方, $R^2$  可用于评价实测值与模拟值之间的吻合程度, $R^2$  越接近于 1,表示模拟值和实测值越吻合。一般认为  $R^2$  大于 0.6, NSE 大于 0.5 时,模型的模拟结果是可信的。

SWAT 建模把流域出口一共概化为 6 个,考虑到数据处理效率以及蒋巷联圩三大汇水区的实际格局,特将每块汇水区的两个出口的流量数据相加,并与整个汇水区内所有电排站的平均排水流量数据进行对比分析。SWAT 模型模拟评价的结果见表 2。

表 2 径流模拟结果

Table 2 Model results of runoff

汇水区	代表电排站	时期	模拟平均流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	电排站平均排水流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$R^2$	NSE
1	九成、后河	率定期	0.884	0.893	0.63	0.70
		验证期	1.074	0.972	0.77	0.86
2	胜利、联圩	率定期	0.892	0.886	0.76	0.77
		验证期	1.147	0.938	0.82	0.79
3	玉丰、西舍	率定期	0.831	0.909	0.70	0.83
		验证期	1.146	0.935	0.70	0.83

从表 2 可以看出,除汇水区 1 率定期的  $R^2$  为 0.63,其余

的  $R^2$  和  $NSE$  均在 0.70 以上, 满足  $R^2$  大于 0.6,  $NSE$  大于 0.5 的模型评价标准, 说明整体上模型的模拟结果反映了研究区的实际水文过程。各汇水区月水量模拟的结果如图 4 所示。

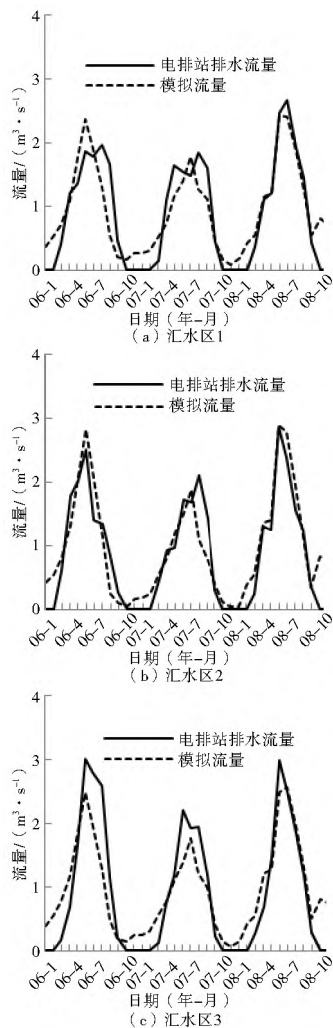


图 4 各汇水区水量模拟结果

Fig. 4 The simulation results of flow discharge in the three drainage area

从图中可以看出, 各汇水区模型模拟的流量和电排站平均排水流量二者在整体趋势上匹配较好, 除个别年份二者峰值略有偏移外, 其他年份均匹配较好。其中, 模型模拟值在每年的 11 月至次年的 2 月均高于电排站的实际排水流量, 这是由于蒋巷联圩的降水主要集中在每年的 3 月-10 月份, 其他月份降水量较小, 这时降水产生的径流暂时储存在圩区的渠道和水塘中, 未达到电排站启动的水位要求, 因此电排站不工作, 抽水量为零, 但 SWAT 模型按照 SCS-CN 值方法计算时仍有地表径流产生。3 月份后随着降水量的增加, 圩区渠道内的储存的水量逐渐增加, 水位达到电排站启动的要求, 电排站开始工作。

从各汇水区的模拟结果来看, 7 月、8 月、9 月的模拟流量普遍低于电排站的排水量, 使二者的匹配程度降低。虽然 7 月、8 月、9 月份的降水量在全年中相对较小, 但该时段对应的电排站的排水量却相对较高, 甚至是全年排水量的最大值。这可能是由于电排站的排水量数据是根据调查的电费推求而来, 部分电排站除主要负责排涝外, 还兼顾水稻种植

季的灌溉任务, 7 月、8 月份正值当地水稻“抢收抢种”时节, 灌溉需求较大。因此估算的排水量数据中包含了部分灌溉用水, 使得估算的排水量偏大。另外, 前期的降水已经使圩区的渠道和水塘等洼地的储水能力达到饱和, 因此较小的降水也能达到电排站启动排水的水位要求。

由于研究仅收集到了电排站每月的用电量数据, 并以此推算出月尺度的排水量, 因此仅能进行月尺度上的对比分析。如果能得到更为详尽的电排站排水过程数据, 则可以进行更小尺度的比较, 能够更加准确细致的反映电排站排水量和降水量峰值之间的时间滞后性等问题。

## 4 结论

由于平原圩区大量存在的圩堤闸坝等水利工程的限制, 使得圩区的水文过程有别于其他自然流域, 产汇流及流出过程都受到各水利工程措施的控制。针对平原圩区的地貌和水文过程特征, 经过汇水区划分、出口概化、河道概化、子流域边界修正等人工干预技术可解决 SWAT 模型在平原圩区应用中的子流域概化难题。蒋巷联圩水文过程的模拟结果表明, 各汇水区率定期  $R^2$  达到 0.63 以上,  $NSE$  到达 0.70 以上, 验证期  $R^2$  达到 0.70 以上,  $NSE$  达到 0.79 以上, 说明结合人工干预技术后, 能够实现 SWAT 模型对平原圩区水文过程的合理模拟。

## 参考文献(References):

- [1] 莫祚年. 圩区水文特性分析及其水位预报[J]. 水文, 2001, 21(4): 35-37. (MO Zuo nian. Hydrological Characteristic and Water Level Forecast in Polders [J]. Hydrology, 2001, 21(4): 35-37. (in Chinese))
- [2] 王娟. 平原区产汇流模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007. (WANG Juan. Runoff Yield and Concentration Simulation in the Plain Area [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [3] 徐爱兰, 王鹏. 基于 SWAT 模型的圩区农业非点源污染模拟[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(1): 38-43. (XU Ai lan, WANG Peng. SWAT-based Simulation of Pollution from Nonpoint Agricultural Sources [J]. Environmental Monitoring and Forecasting, 2010, 2(1): 38-43. (in Chinese))
- [4] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, (9): 1009-1017. (XU Zong xue, CHEN Lei. Progress on Studies and Applications of the Distributed Hydrological Models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, (9): 1009-1017. (in Chinese))
- [5] 王中根, 朱新军, 夏军, 等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 1-6. (WANG Zhong gen, ZHU Xin jun, XIA Jun, et al. Study on Distributed Hydrological Model in Hai River Basin [J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 1-6. (in Chinese))
- [6] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005[M]. Texas: USDA Agricultural Research Service and Texas Agricultural Experiment Station, 2005.
- [7] Setegn S G, Srinivasan R, Dargahi B. Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model [J]. The Open Hydrology Journal. 2008, 2: 49-62.

- [8] 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. (WANG Zhong-gen, LIU Chang-ming, HUANG You-bo. The Theory of SWAT Model and Its Application in Heihe Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))
- [9] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1286-1291. (WANG Jian-ping, SU Bao-lin, JIA Hai-feng, et al. Integrated Model of Nutrients for the Miyun Reservoir and its Watershed [J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1286-1291. (in Chinese))
- [10] 张蕾, 卢文喜, 安永磊, 等. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展[J]. 生态环境学报, 2009, 6(18): 2387-2392. (ZHANG Lei, LU Wen-xi, AN Yong-lei, et al. Advances in Nonpoint Source Pollution Modelling with SWAT Model [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 6(18): 2387-2392. (in Chinese))
- [11] Zhang H, Huang G. Building Channel Networks for Flat Regions in Digital Elevation Model [J]. Hydrological Processes, 2009, (23): 2879-2887.
- [12] Bosch D D, Sheridan J M, Batten H L, et al. Evaluation of the SWAT Model on a Coastal Plain Agricultural Watershed[J]. Transactions of the ASABE, 2004, 5(47): 1493-1506.
- [13] 桑学锋, 周祖昊, 秦大庸, 等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1377-1389. (SANG Xue-feng, ZHOU Zu-hao, QIN Da-yong, et al. Application of Improved SWAT Model to Area with Strong Human Activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1377-1389. (in Chinese))
- [14] 王加虎, 郝振纯, 李丽. 基于 DEM 和主干河网信息提取数字水系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 2(33): 119-122. (WANG Jia-hu, HAO Zhen-chun, LI Li, et al. Extraction of Drainage Structure from Digital Elevation Model by Combination with Raster River Network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 2(33): 119-122. (in Chinese))
- [15] Setegn S G, Srinivasan R, Melesse A M, et al. SWAT Model Application and Prediction Uncertainty Analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia[J]. Hydrological Processes, 2010, (24): 357-367.
- [16] 陈强, 苟思, 秦大庸, 等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 113-119. (CHEN Qiang, GOU Si, QIN Da-yong, et al. A High Efficiency Auto-calibration Method for SWAT Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 113-119. (in Chinese))

(上接第 33 页)

- [14] 舒栋才, 程根伟, 林三益. 基于 DEM 的岷江上游数字流域的离散化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 6-11. (SHU Dong-cai, CHENG Gen-wei, LIN San-yi. Spatial Discretization of Digital Watershed Based on DEM for the Upper Reach of Minjiang River [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, 36(6): 6-11. (in Chinese))
- [15] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 517-520. (XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian, TIAN Xiang-rong. DEM-based Distributed Hydrological Model and Its Application [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese))
- [16] 龙海峰, 熊立华, 万民. 基于 DEM 的分布式水文模型在清江流域的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(1): 71-78. (LONG Hai-feng, XIONG Li-hua, WAN Min. Application of DEM-based Distributed Hydrological Model in Qingjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(1): 71-78. (in Chinese))
- [17] Srinivasan R A, Mold J G. Integration of a Basin Scale Water Quality Model with GIS [J]. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3): 452-460.
- [18] Martz L W, Garbrecht T J. An Outlet Reaching Algorithm for the Treatment of Closed Depressions in a Raster DEM [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25: 835-844.
- [19] 张旭, 蒋卫国, 周廷刚. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(4): 17-21. (ZHANG Xu, JIANG Wei-guo, ZHOU Ting-gang. Hydrological Response Unit Division for Dongting Lake Based on DEM and GIS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(4): 17-21. (in Chinese))
- [20] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5970-5979. (LIU Ming, WANG Ke-lin. Analysis on Hydrological Responses to Changes of Landscape Patterns in the Middle and Upper Reaches of Dongting Lake Watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5970-5979. (in Chinese))
- [21] Beven K J. Distributed Hydrological Modeling: Application of the Topmodel Concept [C]. New York: John Wiley & Sons Limited, 1997.