

Application of VIC Model to Hydrological Response Caused by Urbanization in Dongjiang Basin

Zengxin Yu¹, Jiaquan Deng², Cheng Liu²

¹South China University of Technology, Guangzhou

²Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou

Email: jiaquandeng@163.com

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Zengxin Yu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Zengxin Yu et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: As a grid based semi-distributed hydrological model, VIC is the important tool in evaluating the basin hydrological response to environmental changes. The Dongjiang VIC model is established at the spatial resolution of 0.25° by using the University of Maryland Global Land Cover Facility 1 km dataset, Harmonized World Soil Database and the Meteorological Data from the meteorological or precipitation stations located in the Dongjiang basin. Based on the characteristics of the flow confluence in Dongjiang Basin, the routing model developed by Dag Lohmann is coupled with the VIC to calculate the stream-flow. Monthly values of simulated stream-flow are compared with observations collected from Boluo hydrologic station (1961-1970) to calibrate and verify the VIC model. The results show that the relative errors of average annual runoff are respectively 6.2% and 2.0%, and the Nash-Sutcliffe coefficients are respectively 90.1% and 84.3%, which means that VIC model has good adaptability to the hydrological simulation of Dongjiang Basin. Aiming at the parameterization deficiency of VIC model for stream-flow generation from urbanized areas, the influence of different types of land use and K_{sat} values to stream-flow generation for grid cell is discussed. The results show that there are no key parameters in the vegetation file for stream-flow generation from urbanized areas, while to adjust the value of K_{sat} in the soil file has a positive effect on simulating the base-flow and runoff generation from urbanized areas.

Keywords: VIC Model; Hydrologic Simulation; Dongjiang Basin; Urbanization

VIC 模型在东江流域城市化水文响应研究中的应用

余增鑫¹, 邓家泉², 刘 诚²

¹华南理工大学, 广州

²珠江水利科学研究院, 广州

Email: jiaquandeng@163.com

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘 要: VIC 作为基于单元网格的半分布式水文模型, 是目前评价流域环境变化下水文响应的重要工具。本文以东江流域为研究对象, 利用 Maryland 大学研制的 1 km 植被数据、HWSD 土壤数据集以及流域内气象和雨量站资料, 构建了东江流域空间分辨率 0.25° × 0.25° 的 VIC 模型。利用博罗水文站 1961~1970 年月流量实测数据并结合东江流域的汇流特点, 采用 Dag Lohmann 汇流模型进行参数率定和验证。结果表明: 多年平均径流相对误差分别为 6.2% 和 2.0%, 效率系数分别为 90.1% 和 84.3%, 模型对流域水文模拟具有较好适用性。针对 VIC 城镇区域产流的不足, 利用模型讨论了不同植被和 K_{sat}

作者简介: 余增鑫(1988-), 男, 广东汕尾人, 硕士研究生, 从事流域水文模拟、城市化水文响应研究。

对网格径流的影响, 结果表明植被文件中没有城镇面积产流关键的参数, 而调整土壤文件中的 K_{sat} 值则能很好模拟城镇面积的产流计算。

关键词: VIC 模型; 水文模拟; 东江; 城市化

1. 引言

土地利用/覆被变化(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC)是城市化进程的主要环境变化之一, 由此引起的汇流加快、洪峰增大、总量增加等洪水过程的变化是城市内涝问题日益突出的重要原因。珠江三角洲洪水发生的气候环境特别是下垫面条件发生了深刻变化, 城市化雨洪效应使城市洪涝灾害加重^[1]。目前, 国内外土地利用/覆被变化在流域内水文效应的研究方法有多种, 可归纳为: 实验流域法、特征变量时间序列法、水文模型法以及综合法等^[2]。水文模拟法基于对水文现象的认识, 分析其成因及各要素之间的关系。尤其是基于物理过程描述的分布式水文模型, 因其明确反映出植被、土壤和降雨等因素的空间变异性, 正成为研究城市化水文响应的重要工具。VIC 模型是一种基于 SVATS (Surface Vegetation Atmospheric Transfer Scheme)的大尺度网格单元半分布式水文模型, 可同时考虑陆气之间水量平衡和能量平衡过程的模拟, 已在全球范围内都有了成功的应用^[3-5]。

本文就以珠江的东江流域为例, 构建研究区域 VIC 模型, 对模型进行率定, 检验其在流域径流模拟中的应用能力。并针对 VIC 模型自身的原理方法, 探讨在 VIC 模型中考虑城市化面积的有效方法。

2. 流域概况和 VIC 模型

2.1. 东江流域概况

东江作为珠江流域水系主要河流之一, 发源于江西省寻乌县桠髻钵。上游寻邬水流入广东境内, 至龙川合河坝与安远水汇合成东江, 自东北向西南流经河源、紫金、惠阳、博罗至东莞石龙, 经虎门注入狮子洋。东江干流总长 562 km, 流域总面积 35,340 km²。东江流域属亚热带季风气候, 多年平均气温为 20.4℃, 年气温变化不大; 流域内多年平均雨量为 1750 mm, 降雨年内分配不均, 多集中于汛期(4~9月)。流域内土地利用以耕地、林地为主, 其次为草原、水体及城镇用地等; 流域成土母质以花岗岩和砂页岩为主, 土壤

类型主要是地带性赤红壤。

本次研究选取博罗水文站以上流域, 面积 25,325 km²。流域内及附近有河源、惠阳、连平、寻乌、增城、深圳 6 个气象站, 以及部分雨量站, 站点分布如图 1 所示。

2.2. VIC 模型概述

VIC 模型(见图 2)是一种基于 SVATS 思想的大尺度半分布式水文模型, 可同时在水循环过程中大气-植被-土壤之间的能量平衡和水量平衡进行模拟。模型可在网格内定义不同的植被类型及裸土覆盖, 由植被覆盖层的蒸散发潜力以及空气动力学阻抗、地表蒸发阻抗和叶面气孔阻抗来计算每种植被的蒸散发量。模型上层土壤(第 1、2 层土壤)用以描述土壤对降水过程的动态反应, 而下层土壤(第 3 层)则反映暴雨过程影响的缓慢变化。VIC 模型还同时考虑了三层土壤间的水分扩散, 用 Richard 方程来描述垂向一维土壤水运动, 土壤各层间的水汽通量服从 Darcy 定律。经改进的 VIC 模型同时考虑蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质的次网格非均匀性对产流的影响, 并分别用土壤蓄水容量面积分配曲线和下渗能力面积分配曲线来表示土壤不均匀性对产流的影响。基流计算采用 ARNO 概念模型, 定义在某一阈值之下, 基流是线性消退过程, 而土壤含水量高于此阈值时, 基流为非线性。

3. 东江流域 VIC 模型构建

本研究采用 SRTM 提供下载的 90 m 分辨率 DEM 数据, 以空间分辨率为 0.25° × 0.25° 的单元网格构建 VIC 模型, 模型数据库主要包括植被参数文件、土壤参数文件以及气象驱动文件。并用博罗水文站实测流量资料率定模型的关键参数, 以及验证此东江流域 VIC 模型模拟径流过程的适应性。

3.1. 模型参数

VIC 模型的植被参数主要包括各个网格的植被类

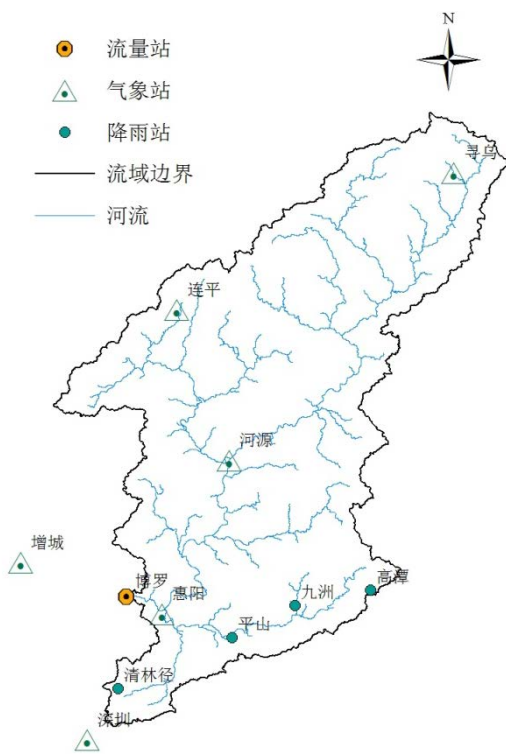


Figure 1. River system and meteorological station
图 1. 东江流域水体概况及水文气象站点

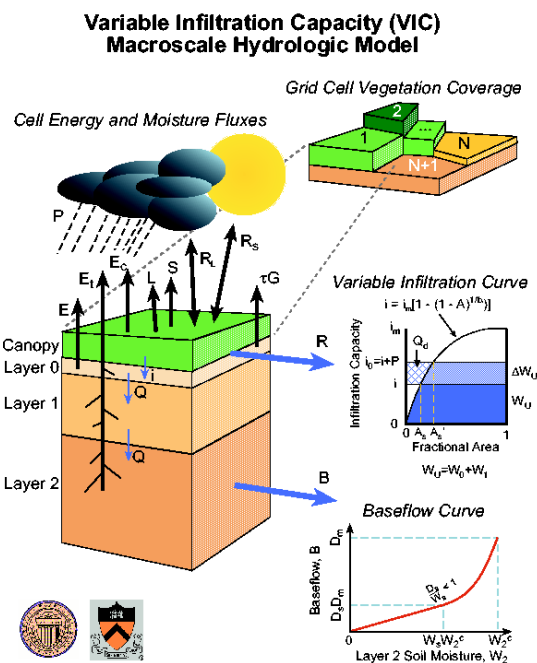


Figure 2. Schematic of the VIC-3L model
图 2. VIC 模型原理示意图

型总数、每种植被的面积比例、根系比例以及逐月叶

面积指数等。本研究的土地覆盖分类采用 Maryland 大学发展的全球 1 km 土地覆盖数据确定的土地覆盖分类, 分为 14 种土地覆盖类型。参数的确定主要参考 LDAS (Land Data Assimilation System) 的成果。图 3 为东江流域 1 km × 1 km 的植被类型空间分布图。

本研究使用的土壤数据来自世界粮农组织和国际应用分析学会共同开发的全球土壤数据库 (HWSD), 空间分辨率为 1 km, 中国境内的数据来源于第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据。该土壤数据库共有 13 种土壤质地类型, 每个网格取网格内优势土壤类型作为模型网格的土壤类型, 且分为上下两层, 0~30 cm 为上层, 30~100 cm 为下层。各种土壤类型的参数主要参考了 Rawls 等的工作^[6], 并采用 Saxton 的公式计算土壤饱和和水力传导度、土壤临界含水量和凋萎含水量^[7]。图 4、图 5 分别为东江流域上层和下层土壤类型空间分布图。

本研究中, VIC 模型只进行水量平衡计算, 模型步长取日。所需气象数据包括日降水量(P), 日最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})以及风速(W)。其中日最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})以及风速(W)数据来自 6 个气象站, 各个网格数据根据泰森多边形原则确定。而降雨数据则根据 6 个气象站和 4 个雨量站的站点信息采用反距离权重法 IDW (Inverse Distance Weighted) 进行空间插值而来。

3.2. 率定与验证

利用 Dag Lohmann 汇流模型^[8], 即坡面汇流采用单位线法, 河道汇流采用线性圣维南方程, 将 VIC 模型生成的各网格的地表径流和地下径流演算至流域出口断面。本文选取博罗水文站 1961~1970 年的月径流实测资料对模型参数进行率定和验证。其中选取 1961~1965 年 5 年的资料对模型中与水文过程密切相关的 7 个土壤数据进行率定, 即蓄水容量曲线方次 B、三层土土壤深度(D_1 、 D_2 、 D_3)以及 3 个基流参数 D_m 、 D_s 和 W_s ; 利用 1966~1970 年的实测资料对率定结果进行验证。参数率定和验证过程中, 采用水文中常用的两个指标进行衡量:

(1) 保证水文模拟中的水量平衡, 反映总量精度的多年平均径流相对误差 E_r (%):

$$E_r = \frac{(\overline{Q_s} - \overline{Q_o})}{\overline{Q_o}}$$

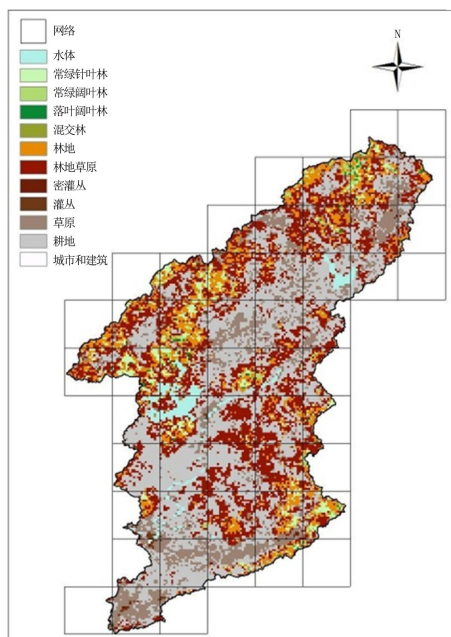


Figure 3. Distribution of LUCC
图 3. 流域植被分布图

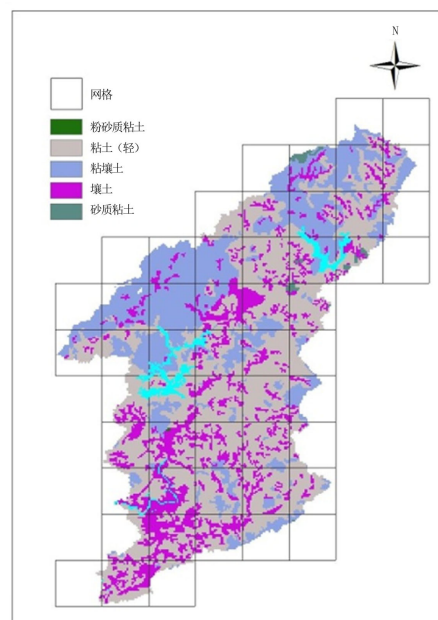


Figure 5. Distribution of sub-soil
图 5. 流域下层土壤分布图

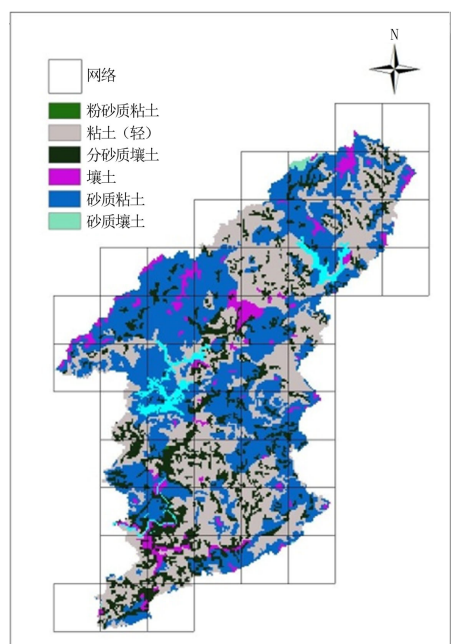


Figure 4. Distribution of top-soil
图 4. 流域上层土壤分布图

(2) 反映流量过程吻合程度的 Nash-Sutcliffe (N-S)效率系数 E_{ns} :

$$E_{ns} = \frac{\sum(Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 - \sum(Q_{i,s} - Q_{i,o})^2}{\sum(Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2}$$

式中: \bar{Q}_s 和 \bar{Q}_o 分别为模拟和水文站实测的长时间序

列的平均径流量, m^3/s , 相对误差 E_r 越接近于零, 精度越高; $Q_{i,o}$ 和 $Q_{i,s}$ 分别为实测和模拟的径流量, m^3/s , 确定性系数越接近于 1, 精度越高。

经博罗实测资料率定得出的东江流域 VIC 模型的模拟结果如表 1 和图 6 所示。由此看出, VIC 模型对东江流域 10 年的模拟结果较好, 率定期和验证期的水量相对误差都控制在 10% 以内, 率定期的 Nash 效率系数更是达到 90.1%, 验证期也能达到 84.3%。据此可看出, VIC 模型对东江流域的径流过程模拟具有较好的适应性。

4. 城市化水文研究中的应用

众所周知, 城市化因其不透水面积的产生、植被的减少、消耗性水量的改变以及水量跨流域的转移等原因影响着流域水文反应。但 VIC 模型现行版本没有包含城镇化面积产流的参数化方法, 国内外很多有关 VIC 模型的研究应用中, 要不被划分成裸土, 要不就把其他土地利用类型重分配以消除城镇面积。

一般来说, 陆面模型有两种方法来表示城镇面积^[9]。第一种就是调整土壤常数(如体积热容量和热导率)和参数(如地表反照率、粗糙度和水分有效性), 以适应城镇不下渗面积。这种方法可以认为是总体参数化方法, 也就意味着它把城镇面块当作一块平整面。第二种方法把城镇冠层模型耦合到现有的陆面模型。虽

Table 1. Measurement indexes for simulation results
表 1. 模拟结果衡量指标

分析时段	相对误差 E_r (%)	效率系数
率定期(1961~1965)	-6.5	0.901
验证期(1965~1970)	-2.0	0.843

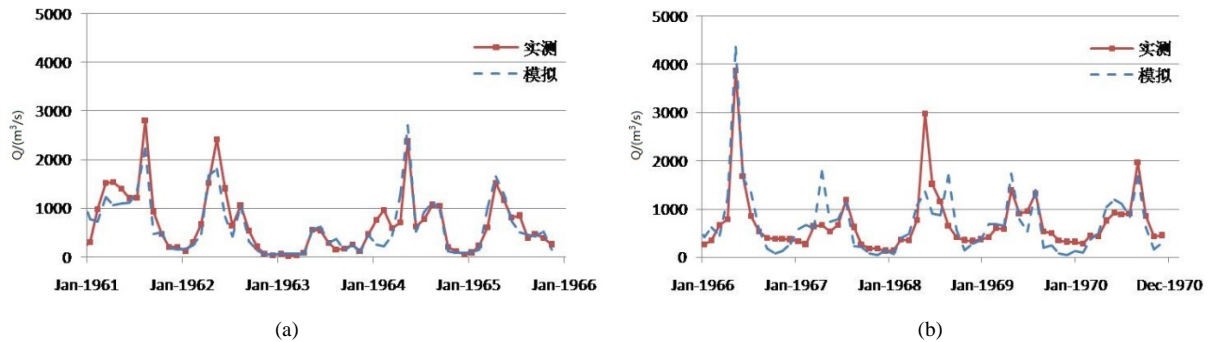


Figure 6. Simulation of the monthly discharge during 1961-1970
图 6. 博罗站 1961~1970 年模拟月流量过程图

然, 第二种方法能在小尺度的区域研究中得到更好的模拟结果, 但是它需要很详细的资料: 如城镇几何形态、峡谷方位以及建筑物和路网之间物理常数的差异。收集大尺度区域的所有这些数据将是一个不可能完成的任务。如果模拟只是应用在大中尺度上, 那么这些详细信息也会在数据均化到模型大网格的过程中丢失。

在本研究中, 利用城镇总体参数化方法以改善 VIC 模型在城市化水文响应研究中的应用。将城镇面积的热力特性修改成接近城镇的数值, 而不是直接套用裸土的。所应用的总体参数主要根据 Taha^[10]的研究成果: 1) 热导率 $\geq 3 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$; 2) 体积热容量(VHC) $\geq 3 \text{ MJm}^{-3}\text{k}^{-1}$; 3) 反照率设置为 0.15。

植被参数直接影响着城镇面积与大气的能量交换以及水分的蒸散发。任何一种径流成分都是在两种不同透水性土壤的界面上产生的。上层土壤中的饱和传导度 K_{sat} (尤其是第二层土壤)对产流形成关键作用。因为这个参数控制了上层土壤向下层土壤排水量。一旦把这个参数设置成很小, 由上层传递的水分就不能顺利地通过界面而进入下层土壤, 所以在界面上积聚水分而形成径流。

为讨论 K_{sat} 对网格产流的影响以及寻找代表城镇面积最优的 K_{sat} 值, 先在一个网格上比较不同土地利用类型和 K_{sat} 的 VIC 模型运行结果, 如图 7 所示。表 2 列出了年平均基流、径流及其增长百分比。由图表

可看出, 植被参数由混合植被改变成城镇, 可能只在覆盖层上改变能量和水汽交换, 而 K_{sat} 对网格内的产流则产生重大影响, 当 K_{sat} 设置成小于 1.0 时, 网格形成的基流开始出现负增长, 径流也急剧增大。 K_{sat} 设置成小于 0.1 时, 基流的减少以及径流的增长呈明显态势。

由此可见, 将模型上层土壤饱和和水力传导度 K_{sat} 调整至小于 0.1 时, 其基流和径流形成都接近于城镇面积产流。用此方法表示城镇面积产流是东江流域城市水文响应研究中的有效方法, 上述结果也为以后 VIC 模型城市区域产流模拟提供参考和依据。

5. 结语

本文以研究东江流域城市化水文响应为目的, 构建了东江流域 VIC 水文模型, 以及利用 Dag Lohmann 开发的汇流模型进行流域汇流计算。分析模型率定期和验证期的模拟结果表明, 模拟结果与博罗水文站流量的相对误差为 6.5%, 2.0%, 效率系数为 90.1% 和 84.3%, VIC 模型在东江流域的水文模拟中具有较好的适应性。

针对 VIC 模型本身没有包含城镇区域产流的参数化方法, 利用东江流域 VIC 模型继续讨论了上层土壤饱和和水力传导度 K_{sat} 对网格产流的影响, 结果表明当 $K_{\text{sat}} \leq 0.1$ 时, 网格基流和径流的形成跟城镇面积的产流机理接近。调整 K_{sat} 可作为流域 VIC 模型计算城

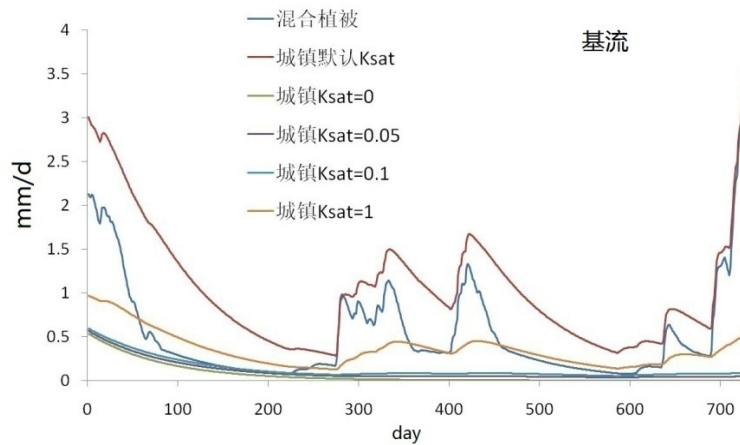


Figure 7. Result of the runs with different LUCC and K_{sat}
图 7. 不同土地利用类型和 K_{sat} 的运行结果

Table 2. Comparison of the baseflow and runoff within a single grid
表 2. 单个网格基流、径流对比

覆被	$K_{sat}/mm \cdot d^{-1}$	年均基流/ $mm \cdot d^{-1}$	增长/%	年均径流/ $mm \cdot d^{-1}$	增长/%
混合	-	0.532	-	2.573	-
城镇	默认(84.15)	1.054	98.12	2.751	6.92
城镇	0.0	0.062	-88.42	3.921	52.39
城镇	0.05	0.100	-81.18	3.883	50.91
城镇	0.1	0.128	-76.01	3.854	49.77
城镇	1	0.348	-34.50	3.620	40.68
城镇	10	0.747	40.32	3.152	22.48
城镇	50	0.983	84.73	2.845	10.57

镇区域产流计算的简单有效方法, 并为 VIC 模型城市区域的产流模拟提供参考和依据。

参考文献 (References)

- [1] 彭涛, 陈晓宏, 刘霞等. 珠江三角洲洪水孕灾环境变化及其洪水响应[J]. 水文, 2008, 28(5): 57-60.
PENG Tao, CHEN Xiaohong, LIU Xia, et al. Flood response to changes of flood disaster formative environment in the Pearl River Delta. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 57-60.
- [2] 李丽娟, 姜德娟, 李九一等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 211-224.
LI Lijuan, JIANG Dejuan, LI Jiuyi, et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 211-224.
- [3] YANG, G. X., BOWLING, L. C., CHERKAUER, K. A., et al. The impact of urban development on hydrologic regime from catchment to basin scales. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 237-247.
- [4] MAO, D. Z., CHERKAUER, K. A. Impacts of land-use change on hydrologic response in the Great Lakes region. Journal of Hydrology, 2009, 374(1-2): 71-82.
- [5] 金君良, 王国庆, 刘翠善等. 大尺度分布式水文模型 VIC 在嘉陵江流域径流模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 55-63.
JIN Junliang, WANG Guoqing, LIU Cuishan, et al. Application of large scale distributed hydrological model to runoff simulation in Jialingjiang River Basin. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(1): 55-63.
- [6] 吴志勇, 陆桂华, 张建云等. 基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 359-364.
WU Zhiyong, LU Guihua, ZHANG Jianyun, et al. Simulation of daily soil moisture using VIC model. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 359-364.
- [7] SAXTON, K. E., RAWLS, W. J., ROMBERGER, J. S., et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 1031-1036.
- [8] NIJSEN, B., LETTENMAIER, D. P., LIANG, X., et al. Streamflow simulation for continental-scale river basins. Water Resource Research, 1997, 33(4): 711-724.
- [9] YANG, G. X., BOWLING, L. C., CHERKAUER, K. A., et al. Hydroclimatic response of watersheds to urban intensity: An observational and modeling-based analysis for the White River Basin, Indian. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11: 122-138.
- [10] Taha, H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38: 466-473.