



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.002

吕爱锋, 贾绍凤. 遥感驱动的分布式实际径流模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 07-11. LYU Ai feng, JIA Shao feng. Simulation of actual runoff using remote sensing driven distributed hydrological model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 07-11. (in Chinese)

# 遥感驱动的分布式实际径流模拟研究

吕爱锋<sup>1,2</sup>, 贾绍凤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 以 WBM/WTM (Water balance model/ Water transport model) 模型为基础, 以遥感反演的月降水和月蒸发为主要数据源, 开发了基于遥感的分布式水量平衡与传输模型 (Remote sensing based Water balance/ Water transport model, RSWB/WTM)。利用 2002 年- 2007 年的 TRMM 卫星的降水数据与 2004 年- 2008 年基于遥感反演的蒸散发数据, 用该模型模拟了白洋淀流域阜平、中唐梅、紫荆关三个水文站的实际径流, 对模型的模拟精度进行了评价。三个站的效率系数均大于 0.54, 其中中唐梅和紫荆关站的效率系数大于 0.62。从  $R^2$  来看, 三个站分别是 0.56、0.64 和 0.64。白洋淀流域水库、塘坝对实际径流的干扰较大, 进而影响到了模型的模拟精度。另外, 遥感反演降水与蒸发存在的不确定性也是影响模拟效率的原因之一。建立的完全以遥感为数据源的分布式水文模拟模型将为基于遥感的水资源评价提供新的技术手段。

**关键词:** 遥感; 降水; 蒸散发; 分布式水文模型; 实际径流; 白洋淀流域

**中图分类号:** TP79    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0007-05

## Simulation of actual runoff using remote sensing driven distributed hydrological model

LYU Ai feng<sup>1,2</sup>, JIA Shao feng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In this paper, we developed a remote sensing driven distributed water balance and water transport model (RSWB/WTM) based on WBM/WTM (Water balance model/ Water transport model) model. Using precipitation and evapotranspiration data retrieved from remote sensing, the monthly discharge of three hydrological stations (Fuping, Zhongtangmei and Zijingguan) in Baiyangdian Region was simulated. Then the accuracy of the model was evaluated using Nash and Sutcliffe model efficiency coefficients (E(NS)) and  $R^2$ . The E(NS) for all stations were above 0.54, among which Zhongtangmei and Zijingguan were larger than 0.62. The  $R^2$  were 0.56, 0.64 and 0.64 for Fuping, Zhongtangmei and Zijingguan, respectively. In recent years, human activities had affected the natural water balance in Baiyangdian largely, thus the accuracy of the model was much influenced. It is also affected by the quality of the remote sensing retrieved data. It is hoped that our RSWB/WTM model and its application in Baiyangdian Region can provide a useful tool for the water resource assessment based on remote sensing data.

**Key words:** remote sensing; precipitation; evapotranspiration; distributed hydrological model; actual runoff; Baiyangdian Region

分布式水文模型的出现为研究变化环境下水循环相关问题提供了强有力的工具<sup>[1]</sup>。分布式水文模

拟需要高时空分辨率的输入数据、验证数据和参数, 而这些数据利用传统的观测方法难以获取, 这极大

收稿日期: 2016-04-11    修回日期: 2016-04-22    网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1140.022.html>

作者简介: 吕爱锋(1977-), 男, 山东莱芜人, 副研究员, 博士, 主要从事水资源系统模拟等方面的研究。E-mail: lvaf@igsnr.ac.cn

通讯作者: 贾绍凤(1964-), 男(土家族), 湖南龙山人, 研究员, 博士, 主要从事水文水资源和区域可持续发展等方面研究。E-mail: jiasf@igsnr.ac.cn

地制约了分布式水文模型的发展<sup>[2,3]</sup>。遥感技术的出现与不断发展为满足分布式水文模拟数据需求、开展空间校正和验证提供了可能。与传统的以点为单元的数据获取方法相比,遥感可以在一定周期范围内不断地获取栅格单元的地表信息,提高了数据的时空分辨率。同时,遥感覆盖范围广,能够获取无人可及的偏远地区以及观测站点稀少区域的资料。数字化的栅格遥感数据与许多分布式流域水文模型的数据格式的一致性,更是为分布式流域水文模型建模和参数的率定提供了有力的数据支持<sup>[4,5]</sup>。遥感开始用于分布式水文模拟主要是提供水文过程相关的地表参数,如土地利用/土地覆被、积雪、植被指数等<sup>[6,11]</sup>。目前较多的研究集中于基于遥感来反演蒸散发过程<sup>[9,12-14]</sup>。而研究利用遥感反演的水文变量,如降水、蒸发,进行水文模拟的研究则不多<sup>[3,15]</sup>。

本文将白洋淀流域为研究区,以遥感反演的降水、蒸散发以及土地利用/土地覆被、土壤类型数据为主要输入数据,通过构建月尺度分布式水文模型,来模拟流域的月水文过程。在本研究中,模型的气候驱动因子将完全来源于遥感数据,避免由于气象站点稀疏而造成的空间数据质量不稳定问题。另外,在用水的退水也回到流域出口的前提下,本研究根据遥感的降水和实际蒸发可以直接模拟流域出口实际径流,进而直接考虑了下垫面变化对径流的影响。而普通水文模型的重点是模拟天然径流,然后在此基础上结合社会用水来计算实际径流。当然,遥感产品本身也存在很大的不确定性和偏差,这也限制了其在分布式水文模拟中的应用。因此,在使用遥感产品之前须对其质量进行检验,对精度进行控制。

## 1 模型的构建

### 1.1 模型结构

月水量模拟是水资源评价的重要基础。遥感反演月尺度降水和蒸发技术的不断成熟,为基于遥感的月尺度分布式水文模型的研究提供了数据基础。本文以 WBM/WTM (Water balance model/Water transport model)<sup>[16,17]</sup> 模型为基础,结合现有数据,建立了基于遥感的水量平衡与水量传输模型(Remote sensing based Water balance/Water transport model, RSWB/WTM)。该模型属于完全分布式水文模型,即逐个单元网格模拟水文循环过程,主要由水量平衡模型和水量传输模型两部分构成,其模型结构见图 1。

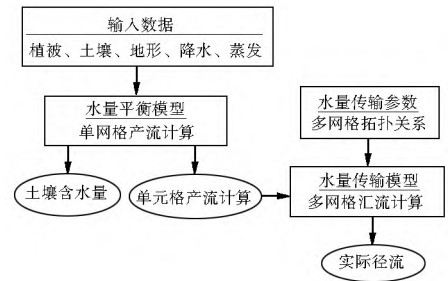


图 1 RSWB/WTM 模型结构  
Fig. 1 Model structure of RSWB/WTM

### 1.2 水量平衡模型

水量平衡模型描述的是栅格产流的过程,输入项包括基于网格的降水、蒸发数据以及土壤类型和植被等下垫面信息,最后计算得到土壤含水量(SM)和单元格的产流量(RO)。

土壤含水量主要由降水(包括降雨和融雪)和蒸发数据决定。在较湿润的月份,降水大于实际蒸发,土壤含水量最大能达到田间持水量(FC),FC 则取决于土壤类型和根系深度;在较干旱的月份,降水小于实际蒸发,土壤含水量是不断减小的。其计算方法如下:

$$dSM/dt = P_r - ET \quad SM < FC \quad (1)$$

$$dSM/dt = 0 \quad SM = FC \quad (2)$$

式中:SM 为土壤含水量(mm); $P_r$  为降雨量(mm/month); $ET$  为实际蒸发量(mm/month); $FC$  为土壤的田间持水量(mm)。

当土壤含水量达到饱和状态,即等于田间持水量时,多余的降水才会形成地表径流。定义单元格上的净雨量为 $X_r$ (mm/month),计算公式分别如下:

$$X_r = P_r - ET - dSM/dt \quad P_r \geq ET, SM < FC \quad (3)$$

$$X_r = P_r - ET \quad P_r \geq ET, SM = FC \quad (4)$$

$$X_r = 0 \quad P_r < ET \quad (5)$$

单元格上的净雨量在当月不可能完全转换为产流量,必有一部分存储在单元格内。单元格的降雨产流量计算如下:

$$dD_r/dt = (1 - \gamma)X_r - \beta D_r \quad (6)$$

$$RO_r = \gamma X_r + \beta D_r \quad (7)$$

式中: $D_r$  为单元格的存储降雨量(mm); $RO_r$  为单元格降水产流量(mm/month); $\gamma$  和  $\beta$  为待率定系数。

### 1.3 水量传输模型

水量传输模型完全基于格网计算,描述栅格之间的汇流过程。利用水量平衡模型计算得到的单元格产流量,结合 DEM 产生的汇流网络,获取任意出口断面单位时间的水量。

每个网格都被看作一个存储水量的单元,水在

流出之前在单元格内都有一定的滞留时间( $t$ ),现在对所有网格定义一个标准的水量传输系数  $K(t-1)$ 。对于单个网格来说,流量计算如下:

$$dS_c/dt = (\sum_1^n Q_u) Q_d + Q_g \quad (8)$$

$$Q_d = K S_c \quad (9)$$

$$Q_g = A(RO_r + RO_s)/1000 \quad (10)$$

式中: $S_c$  为  $t$  时刻单元栅格内的河道存储量( $m^3$ );  $K$  为向下游的水量传输系数( $1/month$ );  $A$  为网格的面积( $m^2$ );  $n$  为流入当前栅格的相邻栅格数目;  $Q_u$  为上游河道的来水量( $m^3/month$ );  $Q_d$  为从网格向下游输出的河道出流量( $m^3/month$ );  $Q_g$  为单元格自身产生的地表径流量( $m^3/month$ )。

式(8) - 式(10) 建立了一个有关联的微分方程,本文在求解  $S_c$  时采用的是欧拉方法<sup>[18]</sup>。

## 2 数据描述与数据处理

### 2.1 研究区介绍

白洋淀流域是指白洋淀及其以上呈扇型分布的大清河 8 条支流的集水区。白洋淀流域位于海河流域中部,地跨晋、冀、京三省市,位于  $113^{\circ}39'E - 116^{\circ}20'E$ ,  $38^{\circ}23'N - 40^{\circ}09'N$  之间,流域面积约  $3 \times 10^4 km^2$ ,见图 2。其上游支流主要发源于于西部太行山脉,自西北向东南汇入白洋淀见图 2。



图 2 白洋淀流域基础地理图

Fig. 2 Geographic information in Baiyangdian Basin

### 2.2 数字高程模型与河网建立

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是分布式水文模拟研制和开发的基础,它决定了栅格之间的拓扑关系,进而影响流域栅格之间的汇流。本文使用的数字高程模型来源于全球 30 弧秒高程数据集(Global 30 Arc Second Elevation Dataset, GTOPO30) ([http://eros.usgs.gov/#Find\\_Data/](http://eros.usgs.gov/#Find_Data/Products_and_Data_Available/GTOPO30)

[Products\\_and\\_Data\\_Available/GTOPO30](http://eros.usgs.gov/#Find_Data/Products_and_Data_Available/GTOPO30))。由于白洋淀流域下游主要以平原为主,完全基于数字高程模型很难获取准确的河网信息。另外,近些年大量水利工程的建设使得平原区河道改变较大。因此,本文在进行基于 DEM 的汇流网络提取之前对 DEM 进行预处理。首先利用 TM 影像对研究区河网进行了解译,建立河网图层;然后,以河网图层为基础,利用 ArcGIS 软件的 Arc Hydro 模型对 DEM 进行重建(Reconditioning)<sup>[19]</sup>,见图 3。

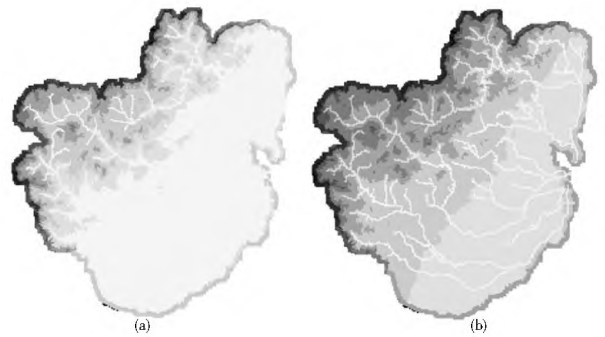


图 3 DEM 数据重建(a)原始 DEM, (b)重建后的 DEM

Fig. 3 Reconditioning of DEM data (a) Original DEM

(b) Reconditioned DEM

### 2.3 植被与土壤数据

植被与土壤数据是控制分布式水文模型参数空间化的基础数据。在本研究中,土壤数据主要用于空间化参数孔隙度( $m^3/m^3$ ),植被数据用于空间化参数植被根系深度(mm)。以上两个参数是获取土壤田间持水量的重要参数。本文使用的植被数据来自 USGS MODIS 产品数据集([https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table/land\\_cover/yearly\\_l3\\_global\\_500\\_m/mcd12q1](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/land_cover/yearly_l3_global_500_m/mcd12q1))的土地覆被产品类型 1,即分类方法采用 IGBP 全球植被分类方案。植被的相关属性数据来自 Liu and Smedt(2004)<sup>[20]</sup>。土壤栅格数据及其属性数据来源于地球系统科学数据共享平台(<http://wcdcre.geodata.cn>)。

### 2.4 基于遥感反演的降水与蒸发数据

降水和蒸发是栅格水量平衡的重要输入数据。本文应用的降水数据来自 NASA 的 TRMM 卫星月降水产品(<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>),并在海河流域进行了订正,时间序列为 2002-2007,空间分辨率为  $25 km \times 25 km$ 。蒸发数据来源于中科院遥感应用研究所农业生态遥感研究室的月蒸发遥感产品<sup>[21-22]</sup>,时间序列为 2004-2008,空间分辨率为  $1 km \times 1 km$ 。蒸发数据的计算过程和验证详见吴炳方等(2008)<sup>[21]</sup>与熊隽等(2008)<sup>[22]</sup>。为了实现

数据空间分辨率的一致, 将降水数据重采样成 1 km × 1 km。

### 3 结果与讨论

由于白洋淀流域大多数河流下游时常出现季节性干枯, 本文选择了上游的阜平站、中唐梅站和紫荆关站对 2004 年- 2007 年的月水量进行了模拟, 并与观测数据进行了对比。

首先利用保定气象站的降雨数据与保定气象站所在网格的遥感反演降水数据进行了对比(图 4), 从中可以看出 2004 年- 2006 年间遥感反演降水与观测降水吻合较好, 而在 2003 年和 2007 年相差较大。因此, 本文选择 2004 年- 2006 年为模型的校验时间段(图 5)。模拟精度采用 Nash 模型效率系数  $E$  和复相关系数  $R^2$  来评价<sup>[23]</sup>。

从图 5 和表 1 可以看出, 三个水文站中, 阜平站 2004 年- 2006 时间段内的效率系数和  $R^2$  分别为 0.54 和 0.56, 较中唐梅和紫荆关两站的效率系数和  $R^2$  低。后两者效率系数和  $R^2$  均大于 0.62。依据 Andersen et al(2002)<sup>[15]</sup> 对模型精度的评价标准, 效率系数大于 0.6 属于可以接受的范围。模型在中唐

梅与紫荆关站的模拟精度是满足需要的。

表 1 白洋淀主要站点模拟精度

Tab.1 Simulation precision of hydrologic stations in Baiyangdian Basin

站点	时间段	$E$	$R^2$
阜平	2004- 2006	0.54	0.56
中唐梅	2004- 2006	0.63	0.64
紫荆关	2004- 2006	0.62	0.64

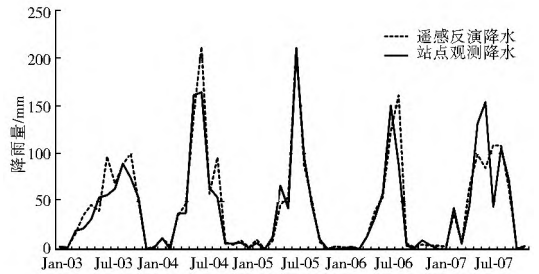


图 4 保定站降水与遥感反演降水对比

Fig. 4 Comparison of measured precipitation and retrieval precipitation by remote sensing in Baoding Station

白洋淀流域人类活动密集, 剧烈地改变着自然的水文循环过程。本文虽然选择大型水库的上游水文站点进行模型精度评价, 以求尽量避免人类生产生活对水文循环的影响。但上游广泛分布的塘坝等

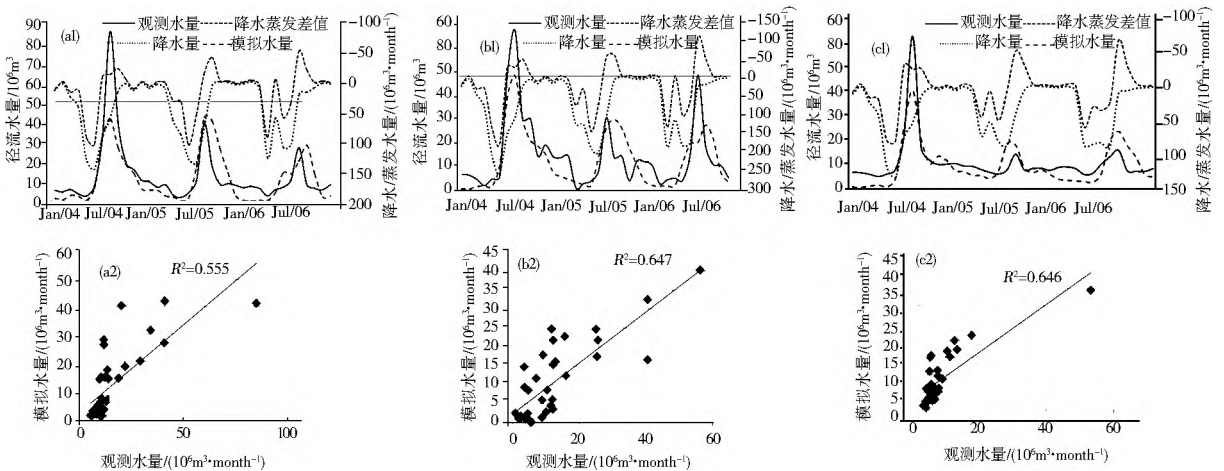


图 5 白洋淀主要水文站点降水、降水蒸发差值与水文过程线及模拟观测水量散点图

a 为阜平站, b 为中唐梅站, c 为紫荆关站, 其中 1 为过程线图, 2 为散点图

Fig. 5 Precipitation, subtraction between precipitation and evaporation, and hydrograph in Fuping station (a1), Zhongtangmei station (a2) and Zijingguan station (a3), and their scatter diagrams between observed and simulated water volume (c1, c2, and c3)

水体对水文循环仍然存在较大的影响。图 6 是通过 google earth 标示的坑坝和水塘见图 6。这些水体的存在改变了水循环的产汇流过程, 进而对模型的模拟效率产生影响。

遥感具有很强的时空分辨率, 但同时由于大气气溶胶、云层的干扰, 使得数据质量存在的很大的不确定性, 这种不确定性会增大反演产品的质量的不确定性。因此, 我们认为遥感反演产品的不确定性是影响模型精度的另一个重要因素。



图 6 白洋淀流域上游主要小坝等水体的分布 (白色标注是小坝等水体)

Fig. 6 Small dams in the upper reaches of Baiyangdian Basin (marked in white)

## 4 结论与展望

遥感技术的出现和发展使得水资源研究能够获取传统站点观测所难以获取的空间水循环相关信息,克服了由于空间变异而造成的评价误差。以遥感为数据源,发展完全基于网格的分布式水文模型,将是全球变化水文学以及无观测资料区水文学研究的重要工具。本文以 WBM/WTM (Water balance model/ Water transport model) 模型为基础,以遥感反演的月降水和月蒸发为主要数据源,开发了基于遥感的分布式水量平衡与水量传输模型 (Remote sensing based Water balance/ Water transport model, RSWB/WTM)。利用 2002 年 - 2007 年的 TRMM 卫星的降水数据与 2004 年 - 2008 年基于遥感反演的蒸散发数据,模型在白洋淀流域得到了应用,取得了较好的模拟效果。

遥感以其较高的空间分辨率,不仅为水文模型提供高分辨率的输入数据,同时也是进行分布式水文模型空间验证的重要工具,比如土壤湿度的空间验证等。由于云等因素的干扰,单纯基于遥感的水文要素反演也存在误差和不确定性。因此,我们认为,遥感、站点观测与分布式水文模型三者的数据同化与互验证将是基于遥感的分布式水文模拟的重要研究方向。

### 参考文献 (References):

- [1] Refsgaard J C, Abbott M B. The role of distributed hydrological modelling in water resources management. In: Abbott M B, Refsgaard J C. Distributed hydrological modelling [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 1-16.
- [2] Grayson R B, Blöschl G, Western A W, et al. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(8-12): 1313-1334.
- [3] Stisen S, Jensen K H, Sandholt I et al. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin[J]. Journal of Hydrology, 2008, 354(1-4): 131-148.
- [4] De Troch F P, Troch P A, Su Z, et al. Application of remote sensing for hydrological modelling. In: Abbott M B, Refsgaard J C. Distributed hydrological modelling [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 165-192.
- [5] 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(08): 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(08): 1022-1028. (in Chinese))
- [6] 王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟 - N 模型的原理与结构[J]. 水科学进展, 2004, 15(04): 501-505. (WANG Zhonggen, ZHENG Hongxing, LIU Changming, ZHAO Weimin. GIS/RS based distributed hydrological modeling I, model theories and structures [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(04): 501-505. (in Chinese))
- [7] Boegh E, Thorsen M, Butts M B, et al. Incorporating remote sensing data in physically based distributed agricultural hydrological modeling [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1-4): 279-299.
- [8] Biftu G F, Gan T Y. Semi distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data [J]. Journal of Hydrology, 2001, 244(3-4): 137-156.
- [9] Chen J M, Chen X, Ju W, et al. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs [J]. Journal of Hydrology, 2005, 305(1-4): 15-39.
- [10] 房世峰, 裴欢, 刘志辉, 等. 遥感和 GIS 支持下的分布式融雪径流过程模拟研究 [J]. 遥感学报, 2008, 12(04): 655-662. (FANG Shifeng, PEI Huan, LIU Zhihui, et al. Study on the distributed snow melt runoff process based on RS and GIS [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(04): 655-662. (in Chinese))
- [11] Immerzeel W W, Droogers P, De Jong S M, et al. Large scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1): 40-49.
- [12] Mauser W, Sch S. Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212-213: 250-267.
- [13] Immerzeel W W, Droogers P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 411-424.
- [14] Boegh E, Poulsen R N, Butts M, et al. Remote sensing based evapotranspiration and runoff modeling of agricultural, forest and urban flux sites in Denmark: From field to macro scale [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3-4): 300-316.
- [15] Andersen J, Dybkjaer G, Jensen K H, et al. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2002, 264(1-4): 34-50.
- [16] Vêsmarty C J, Moore III B. Modeling basin scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi River [J]. Studies in Geophysics, 1991, 12: 271-311.
- [17] Vêsmarty C J, Moore III B, Grace A L, et al. Continental scale model of water balance and fluvial transport: an application to south America [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1989, 3: 241-265.
- [18] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (LI Qingyang, WANG Nengchao, YI Dayi. Numerical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [19] Maidment D R. Arc hydro: GIS for water resources [M]. ESRI Press, 2002.
- [20] Liu Y B, Smedt F De. WetSpa extension, a GIS based hydrologic model for flood prediction and watershed management. Documentation and user manual, 2004. ([http://wetspa.googlecode.com/files/WetSpa\\_manual.pdf](http://wetspa.googlecode.com/files/WetSpa_manual.pdf)).
- [21] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜, 等. 基于遥感的区域蒸散量监测方法 ET Watch [J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 671-678. (WU Bingfang, XIONG Jun, YAN Nanna, et al. ET Watch for monitoring regional evapotranspiration with remote sensing [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 671-678. (in Chinese))
- [22] 熊隽, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 遥感蒸散模型的时间重建方法研究 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 53-59. (XIONG Jun, WU Bingfang, YAN Nanna, et al. Research on temporal reconstruction of evapotranspiration by using remote sensing [J]. Progress in Geography, 2008, 27(2): 53-59. (in Chinese))
- [23] Nash I E, Sutcliffe I V. River flow forecasting through conceptual models I [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10: 282-290.