

# 基于简单水平衡模型的流域 LUCC 水文效应模拟研究<sup>\*</sup>

钱 健,赵智杰

(北京大学 环境科学与工程学院,北京 100871)

**摘 要:**以快速城市化的深圳宝安为研究区,用近 20 a 的 TM 卫星影像解译出该区土地利用变化,以 1995 年的降雨蒸发数据为基准,在修正的简单水平衡模型中模拟研究了流域土地利用变化的水文效应。结果表明,城市化造成的土地利用变化使得宝安区的总径流量呈上升趋势,土壤和地下水蓄水量逐年减少,年内分配不均匀程度则呈增大趋势。1990 - 2007 年,区域年总径流量增加了 8.05%,月均土壤和地下水蓄水量均减少了约 30%,径流年内分配不均匀系数增大 2.33%。这些在一定程度上反映了流域调蓄能力和水土保持功能的下降。另一方面,因土地利用变化的区域差异,不同流域的水文效应不同。研究结果对流域尺度的水资源评价和管理有参考意义。

**关键词:**简单水平衡模型;流域;LUCC;水文效应;模拟

**中图分类号:**P343.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)03-00011-05

## Simulation Research of Hydrological Response on Watershed Land Use and Land Cover Change Based on a Simple Water Balance Model

QIAN Jian, ZHAO Zhi-jie

(College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This paper takes Bao'an District of Shenzhen as a study area since its rapid urbanization. Regional landuse changes in nearly 20 years are analyzed by interpreting TM images. A modified simple water balance model is applied to research hydrological response on watershed landuse changes, using rainfall and evaporation data of 1995. The results show that, landuse changes which caused by urbanization result in a yearly increasing trend of the total runoff volume, while soil and groundwater storage capacity is decreasing. Moreover, the degree of inner-annual distribution unevenness shows an increasing trend. From 1990 to 2007, the regional total annual runoff increased by 8.05%, the monthly average soil water and groundwater storage capacity both decreased by about 30%, inner-annual distribution unevenness coefficient of runoff increased by 2.33%. To some extent, these phenomena reflect the decline in watershed regulation and storage capacity, as well as soil and water conservation function. On the other hand, different hydrological responses of different basins are due to the regional differences of landuse changes. The research has reference value in water resource assessment and management in the watershed scale.

**Key words:** simple water balance model; watershed; LUCC; hydrological response; simulation

随着全球环境变化研究的深入开展,土地利用/土地覆盖变化(Land Use/Land Cover Change, LUCC)及其环境影响成为目前全球研究的热点和前沿问题。水文过程机理比较复杂,它不仅与陆地表层系统中各种自然地理要素的时空分布密切相关,而且对农业开发、城市化等土地利用变化有高度的敏感性及相关性,国际上很多研究机构都把土地

利用变化的水文响应作为全球变化的重要研究内容之一。目前的研究结果表明:在较长时间尺度上,气候变化对水资源的影响更加明显,但在短期内,土地利用变化是水文变化的主要驱动要素之一<sup>[1]</sup>。土地利用变化影响到降雨入渗、径流和蒸散等各个方面,目前 LUCC 水文效应的研究主要侧重于径流影响<sup>[2]</sup>,研究主要集中在对年径流量的影响、对枯水径

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009-02-18

作者简介:钱健(1984-),女,浙江省象山县人,在读硕士,研究方向水资源与水沙环境。E-mail: qianjian626@gmail.com

通信作者:赵智杰(1967-),男,北京人,副教授,研究方向水环境模型。E-mail: zjzhao@pku.edu.cn

流量的影响、对洪水过程的影响等方面<sup>[3]</sup>。

LUCC 水文效应研究方法可归纳为试验流域法、特征变量时间序列法、水文模型法、综合法四类<sup>[2]</sup>。就水文模型法而言,自 1960 年以来,随着计算机技术的发展,有了长足的进步,但目前利用流域水文模型模拟土地覆被变化影响的研究仍处在起步阶段<sup>[4]</sup>。利用“基于 DEM 的分布式水文模型”来研究 LUCC 的水文效应是当前很普遍的一类方法,如于磊等<sup>[5]</sup>应用 SWAT 模型来研究中尺度流域土地利用变化水文响应,李恒鹏等<sup>[6]</sup>应用 STREAM 模型来模拟太湖流域土地利用变化的水文响应。但是很多的分布式水文模型都有参数和变量数目多,不易验证的问题。有些分布式水文模型虽然具有很强的水文物理基础和完善的模型结构,但由于计算时间过长或数据存储过大,根本无法在当前条件下进行推广和应用<sup>[7]</sup>。本文修正了 Mantoudi K. 等<sup>[8]</sup>提出的基于 GIS 网络的简单水平衡模型,应用其来研究土地利用变化对流域径流量以及土壤和地下蓄水量的影响,用子流域的实测径流数据拟合得到不同土地利用类型的模型参数,并扩展应用到整个研究区。

## 1 研究区概况及 LUCC

### 1.1 研究区概况

宝安区地处深圳市西北部沿海,北与东莞市接壤,东与龙岗区相邻,东南紧靠南山区。本地区属于亚热带海洋性季风气候,全年温暖湿润,光热充足,日照时间长,雨量充沛。气温和降水随季风的转换而变化,一年内有冷暖和干湿季之分。雨热同季,降水和热量的有效利用率高。年平均气温 21.4 ~ 22.3,多年平均降雨约 140 d,年平均降雨量 1 519.2 ~ 2 206.5 mm,年平均水面蒸发量 1 322 mm。区域总面积 733 km<sup>2</sup>,可分为茅洲河、观澜河、西部三大流域。位于宝安区西南部的铁岗水库是深圳市的水源保护区之一,集水面积约 60 km<sup>2</sup>,最大库容 6.840 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。

### 1.2 研究区 LUCC

用宝安区 1990 - 2007 年每隔 4 ~ 5 a 同季 TM 卫星影像解译土地利用覆被状况,根据当地的实际情况将土地利用类型分成建设用地、林地、园地、水域、裸地 5 类。宝安区和铁岗水库流域土地利用类型构成变化如图 1、2 所示。从图中可以看出,近 20 a 来,随着区域城市化进程的加快,宝安区的建设用地面积迅速增加,林地、园地、裸地、水域面积都呈不同程度的下降趋势。对于铁岗水库流域,总体来看其城市化进程相对缓慢,建设用地面积也呈明显上

升趋势,林地和裸地面积呈下降趋势,园地面积相对稳定,而水域面积则由于大坝加高和水库功能的改变而有所增加。

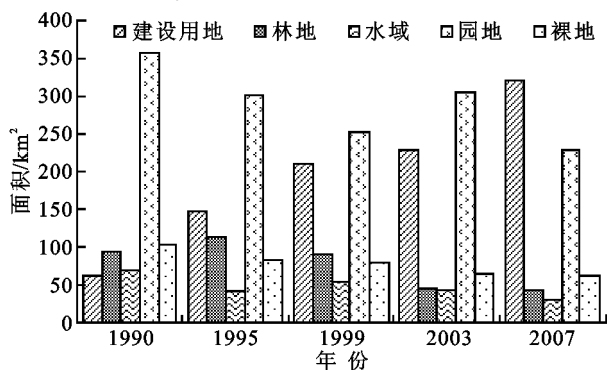


图1 宝安区 1990 - 2007 年土地利用变化

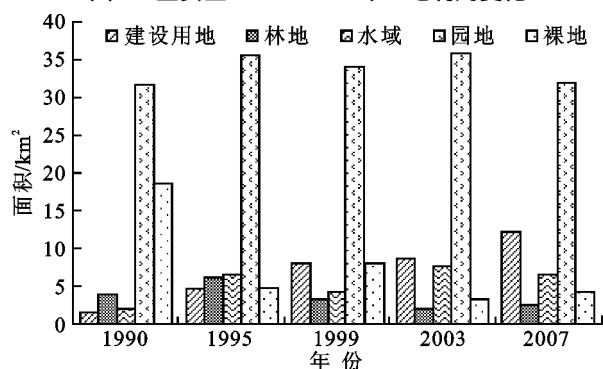


图2 铁岗水库流域 1990 - 2007 年土地利用变化

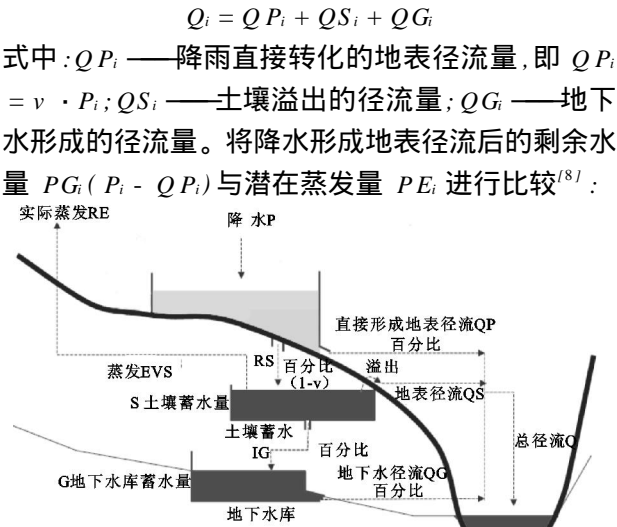
## 2 研究模型构建

### 2.1 简单水平衡模型简介

基于 GIS 的简单水平衡模型通过一个由描述降水、土壤水和地下水的假想蓄水池组成的相互连接的系统,根据流域基本的地理数据和水文气象数据,模拟水量的转化过程,计算出流域径流量。可以用流域出口处的实际径流量监测值检验模型。模型基于 GIS 栅格数据,将流域划分为若干的水文网格单元,计算出每个网格逐月的净径流量,将各网格的净径流量汇总即为各流域出口的径流量<sup>[8-10]</sup>。根据研究需要,简化修正原模型:因研究区地处亚热带,全年无降雪,降水量即为降雨量。经过简化后的模型的输入变量为降水量  $P$  和潜在蒸发量  $PE$ ,输出变量为土壤蓄水量  $S$ 、地下水蓄水量  $G$ 、径流量  $Q$  和实际蒸发量  $RE$ 。模型的 4 个参数分别为表示地表不透水性的  $v$ 、土壤蓄水容量  $K$ 、土壤水退水系数和地下水退水系数。水平衡概念模型如图 3 所示。

模型的基本水平衡方程为<sup>[9]</sup>:  $P - RE = S + G + Q$ 。

对于第  $i$  个时间,某个水文单元产生的总径流量  $Q$  由下式计算得到:



**图 3 水平衡概念模型**

(1) 若  $P G_i \geq P E_i$ 。  $R E_i = P E_i$ , 降雨渗入土壤的水水量  $R S_i = P G_i - P E_i$ , 土壤蓄水池的蒸发量  $E V S_i = 0$ ;

(2) 若  $P G_i < P E_i$ 。  $E V S_i = \min[(P E_i - P G_i) \times (S_{i-1} / K), S_{i-1}]$ ,  $R S_i = 0$ ,  $R E_i = P G_i + E V S_i$ 。

然后将土壤蓄水量中间值  $S_{0i} = S_{i-1} + R S_i - E V S_i$  与土壤蓄水负荷  $K$  比较, 若  $S_{0i} > K$ ,  $Q S_i = S_{0i} - K$ ,  $S_{0i} = K$ ; 否则,  $Q S_i = 0$ 。土壤蓄水池提供给地下水池的水量  $I G_i = \alpha \times S_{0i}$ , 地下水形成的径流量  $Q G_i = \alpha \times (G_{i-1} + I G_i)$ , 地下水蓄水量  $G_i = G_{i-1} + I G_i - Q G_i$ ; 土壤蓄水量  $S_i = S_{0i} - I G_i - Q S_i$ 。

模拟一开始需给出初始的土壤蓄水量  $S_0$ 、地下水蓄水量  $G_0$ 、各模型参数以及逐月的降水和潜在蒸发量, 根据以上各式即可求出各时间序列的模拟结果。

研究表明<sup>[11-12]</sup>, 对于湿润地区, 蒸发皿法测得的水面蒸发量是潜在蒸发力的一种表征方式, 因此对于输入变量潜在蒸发量  $P E$ , 本研究中由实测的水面蒸发量代替。对于初始的土壤蓄水量  $S_0$  和初始地下水蓄水量  $G_0$ , 模拟开始时间为 12 月旱季, 按照流域水平衡原理, 对于长时间来说土壤和地下蓄水应处于一个相对稳定的动态过程, 同时经模型实际案例调试亦发现土壤蓄水和地下蓄水以年为单位呈现循环稳定状态, 每年年末或年初都达到最低值, 且与初始值关系不大, 因此蓄水量初始值采取与起始月对应的每年同时间的模拟平均值。

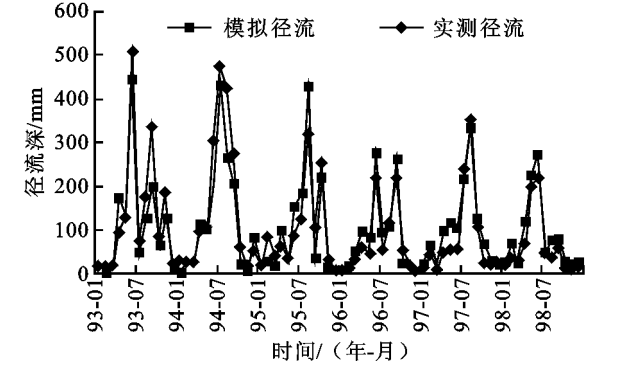
2.2 参数率定

经参数灵敏度分析, 流域径流的敏感参数是土壤蓄水容量  $K$  和不透水系数  $v$ , 这两个与土地利用变化是密切相关的, 本研究主要关注此二参数, 不同土地利用类型的  $K$  和  $v$  不同, 其余参数在整个区域

采用相同的值。模拟结果的检验采用相关系数  $R^2$  和 Nash - Suttelife 系数, 后者反映了模拟值和实测值在量上的统计差异程度<sup>[13]</sup>。两个系数的值可以在 0~1 之间变化, 其结果越接近 1 表示模拟效果越好, 越接近 0 表示模拟效果越差。

将铁岗水库流域作为模型参数率定和验证区, 参数率定采用水库实际的降雨蒸发和径流数据, 再将拟合出的优化参数应用于整个宝安区及各个子流域。得出参数最优化组合的方法是:

首先, 参考前人的经验参数<sup>[8-9]</sup>, 应用 1993 - 1998 年的数据进行统一参数的率定, 整个流域采用同一个参数, 得到研究区土壤退水系数  $\alpha = 0.56$ , 地下水退水系数  $\beta = 0.38$ 。模拟的径流量与实测值趋势吻合(图 4), 相关系数为 0.92, Nash - Suttelife 系数为 0.85。



**图 4 统一参数拟合结果**

然后, 再用铁岗水库的 1995 - 1996 年的气象和径流数据以及 1995 年的土地利用数据进行各地类的参数  $K$  和  $v$  的率定。采用规划求解和经验判断结合的方法, 得出铁岗水库流域各土地利用类型的最优参数组合(表 1)。模拟的径流量与实测值趋势吻合(图 5), 相关系数为 0.96, Nash - Suttelife 系数为 0.92。

表 1 不同地类参数率定结果		
土地利用类型	不透水系数 $v$	土壤蓄水负荷 $K/\text{mm}$
建设用地	0.633	90
林地	0.291	300
水域	1	-
园地	0.303	320
裸地	0.369	100

2.3 模型验证

将得到的优化参数应用于 1998 年(土地利用构成采用 1999 年 2 月数据), 进行模型验证。模拟的径流量与实测值趋势基本吻合(图 6), 相关系数为 0.98, Nash - Suttelife 系数为 0.95。由此证明, 本研究所建模型具有较高的精度和可靠性, 可应用于 LUCC 的水文效应模拟研究。

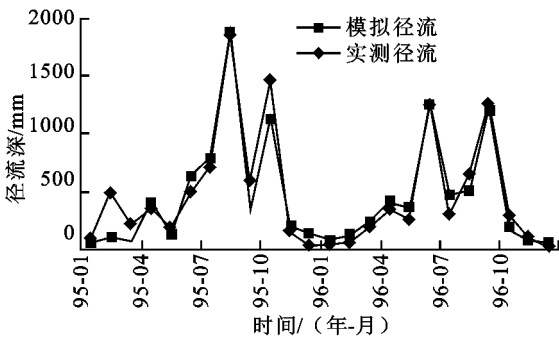


图 5 铁岗水库流域 1995 - 1996 年径流模拟结果

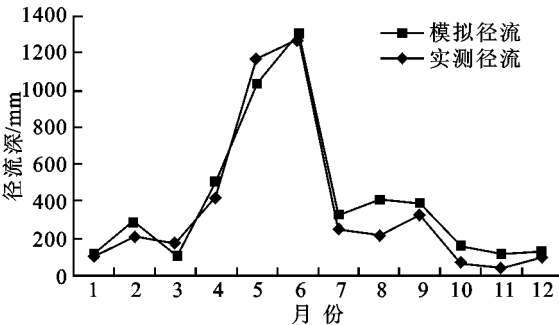


图 6 铁岗水库流域 1998 年径流模拟结果

3 LUCC 水文效应模拟

应用拟合出的不同土地利用类型的参数组合模拟研究宝安区土地利用变化的水文效应。以 1995 年的气象数据为基准,采用 1990 - 2007 年的土地利用结构类型来对比模拟,分析流域径流量、土壤蓄水量等对土地利用变化的响应。

3.1 宝安区土地利用变化的水文效应分析

3.1.1 径流量变化 从表 2 可以看出,宝安区城市扩张带来的城市建设用地的增加和绿地面积的减少,使得流域总径流量  $Q$  呈逐年震荡上升趋势,2007 年总径流量相比 1990 年增加了 8.05 %。其中,地表径流  $QP$  逐年增加,而壤中流  $QS$  和地下径流  $QG$  逐年减少。这从一定程度上表明城市扩展会带来洪水的危险。

表 2 宝安区 1990 - 2007 年径流模拟结果

统计项	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>				
	1990	1995	1999	2003	2007
地表径流	542.19	555.39	612.04	607.22	649.99
壤中流	17.37	14.25	13.38	10.79	10.29
地下径流	146.71	137.47	119.93	120.91	102.84
总径流量	706.27	707.11	745.35	738.92	763.12
$C_v$	1.073	1.075	1.088	1.083	1.098

用径流年内分配不均匀系数  $C_v$  来分析土地利用变化对径流年内逐月变化规律的影响,  $C_v$  的计算公式如下<sup>[14]</sup> :

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2}}{\bar{R}} \quad \left( \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i \right)$$

式中:  $R_i$  ——年内各月径流流量;  $\bar{R}$  ——年内月平均径流流量。  $C_v$  值越大,表明年内各月径流流量相差悬殊,径流年内分配越不均匀。1990 - 2007 年  $C_v$  值呈增大趋势(表 2),2007 年  $C_v$  值比 1990 年增大了 2.33 %,表明径流年内分配不均匀程度逐年加大。此外,对比 2007 年与 1990 年月经流量,丰水月经流都有很大程度的增加,枯水月则是减少,其中降水最大月经流量增加了 1 935.2 万 m<sup>3</sup>,降水最小月的径流量减少了 769.2 万 m<sup>3</sup>。这些都反映出城市的扩张使得区域调蓄功能和水土保持能力下降。

从表 3 可以看出,在同样降雨和蒸发条件下,不同下垫面的产流量在不同年份是不同的。建设用地产流量逐年上升,其余地类的产流量总体都呈下降趋势,这与各个地类的面积随时间变化的规律(图 1)是吻合的。

表 3 宝安区不同土地利用类型年径流量 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

年份	建设用地	林地	水域	园地	裸地
1990	78.58	79.96	134.29	309.17	104.27
1995	187.93	96.38	78.88	260.68	83.24
1999	266.66	78.21	103.77	217.64	79.08
2003	288.56	38.56	81.97	264.25	65.57
2007	406.64	36.73	58.90	198.27	62.59

3.1.2 蓄水量变化 从表 4 可以看出,随着城市建设用地的增加和绿地面积的减少,使得宝安区土壤和地下蓄水量呈逐年减少趋势,1990 - 2007 年,土壤蓄水量和地下水蓄水量均减少了约 30 %。由此反映了城市化导致区域水土保持能力的下降。

表 4 宝安区 1990 - 2007 年月均土壤和地下蓄水量

统计项	比较模拟结果 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>				
	1990	1995	1999	2003	2007
月均土壤蓄水量	9.34	8.87	7.59	7.88	6.52
月均地下蓄水量	19.28	18.07	15.76	15.89	13.52

3.2 各流域水文效应分析

受土地利用变化的区域差异影响,不同区域水文响应特征不同<sup>[6]</sup>。对比宝安区三大流域 1995 年与 2007 年的各土地利用类型的变化(表 5)可以看出,各流域城市建设用地增加幅度各不相同,观澜河流域建设用地的扩张程度最高,达到 2.5 倍,西部流域相对最低,为 50 %;茅洲河流域除了建设用地面积增加外,裸地的面积明显增加,这与其他两个流域裸地变化规律相反;此外,茅洲河流域的林地、水域和园地面积的减少幅度都是三大流域中最大的。

表 5 宝安区三大流域 1995 年与 2007 年各土地利用类型变化比较				%
土地利用类型	茅洲河流域	观澜河流域	西部流域	
建设用地	140.46	253.44	51.61	
林地	- 69.27	- 54.74	- 52.76	
水域	- 47.23	- 6.81	- 12.13	
园地	- 26.69	- 20.23	- 22.52	
裸地	31.13	- 44.07	- 26.67	

同样采用 1995 年的气象数据,对比模拟三大流域的水文效应。结果显示(表 6),2007 年茅洲河、观澜河和西部流域的总径流量比 1995 年分别增加了 8.66%,10.94%,4.66%,而月均土壤和地下蓄水量则都减少,这主要也是由建设用地扩张幅度的不同引起的。同时还可以看出,茅洲河流域的土壤和地下蓄水量减少幅度都是最大的,这主要是其绿地覆被面积的减少幅度最大引起的。

表 6 宝安区三大子流域 1995 年与 2007 年 LUCC 水文效应比较				%
统计项	茅洲河流域	观澜河流域	西部流域	
总径流量变化	8.66	10.94	4.66	
月均土壤蓄水量变化	- 32.14	- 21.57	- 20.60	
月均地下蓄水量变化	- 27.91	- 25.51	- 19.92	

4 结 论

宝安区近 20 a 的土地利用变化主要表现为城市建设用地扩张,占用其它土地类型,由此导致地表径流量逐年增加和土壤、地下径流量减少,总体表现为总径流量的逐年增加,土壤和地下蓄水量则呈降低趋势。1990 - 2007 年,总径流量增加了 8.05%,土壤蓄水量和地下水蓄水量均减少了约 30%。从年内分配变化规律看,城市扩张使得径流的年内分配不均匀程度增加,2007 年  $C_v$  值比 1990 年增大 2.33%。这些综合反映了城市化进程降低了流域调蓄和水土保持功能。此外,由于土地利用变化区域差异的影响,不同流域的水文响应特征也不同。

本研究使用的模型具有变量和参数少的特点,用流域出口处的监测流量即可进行模型验证,且可应用于分布式的动态模拟。根据实测数据率定模型参数,得到不同土地利用类型的优化参数组合,经验证模拟表明模型具有较高的精度和准确性,能够定

量模拟研究径流量、土壤蓄水量、地下水蓄水量等受土地利用覆盖变化影响的变化规律。鉴于目前宝安区没有常规的水文站,模拟结果还能够弥补流域水文监测资料的不足。研究结果对于快速城市化地区土地利用变化环境下的流域水资源评价和管理具有参考意义。

参考文献:

[1] 李昌峰,高俊峰,曹慧.土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J].土壤,2002,22(4):191-196,205.

[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(2):211-224.

[3] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等.土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J].水土保持学报,2004,18(3):5-8.

[4] 谢平,朱勇,陈广才,等.考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用[J].山地学报,2007,25(3):257-264.

[5] 于磊,朱新军.基于 SWAT 的中尺度流域土地利用变化水文响应模拟研究[J].水土保持研究,2007,14(4):53-56.

[6] 李恒鹏,杨桂山,金洋.太湖流域土地利用变化的水文响应模拟[J].湖泊科学,2007,19(5):537-543.

[7] 王中根,刘昌明,吴险峰.基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J].自然资源学报,2003,18(2):168-173.

[8] Mantoudi K. Development of a simple water balance model using geographical information systems [D]. Athens: Hydraulic and Maritime Engineering-National Technical University of Athens,2000.

[9] 曾维华,孙强,杨志峰.基于 GRID 的流域动态水平衡模型研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):73-77.

[10] Mantoudi K, Mamassis N, Koutsoyiannis D. A simple water balance model using a geographical information system[C]// 26th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice - France,2001.

[11] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.

[12] 谢贤群,王菱.中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J].自然资源学报,2007,22(5):683-691.

[13] 赖格英,刘志勇,刘胤文.流域土地利用/覆盖与植被变化的水文响应模拟研究[J].水土保持研究,2008,15(4):10-14.

[14] 王金星,张建云,李岩,等.近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-661.