

# 气候变化及人类活动影响下的潮白河 月水量平衡模拟

王纲胜<sup>1</sup>, 夏 军<sup>1,2</sup>, 万东晖<sup>2</sup>, 叶爱中<sup>2</sup>

( 1.中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;  
2.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072 )

**摘要** : 尽管分布式水文模型已有 30 多年的发展历史 , 但是迄今的应用还只是其潜力的很少一部分。Freeze-Harlan 蓝图中由于理论上的深化带来了应用上的困难 , 同时也指出模型并不是越复杂越好。按照科学的建模原则 , 建立了一个简单的分布式月水量平衡模型( DTVGM ) , 其中通过引入土壤湿度因子 , 改进后的 Bagrov 模型同时考虑了前期土壤湿度与降水对蒸散(发)的贡献 ; 通过设置人类活动影响背景参数集 , 表述人类活动对水文过程的影响。将 DTVGM 月模型应用于华北地区密云水库以上潮白河流域 , 识别出白河流域气候变化对径流减少的贡献为 44% , 人类活动导致下垫面变化对径流减少的影响达 54% , 潮河流域气候变化的贡献率为 24% , 而人类活动的贡献率高达 74% , 是导致径流减少的主要原因。

**关键词** : 月水量平衡模型 ; 气候变化 ; 人类活动 ; 华北 ; 潮白河流域

中图分类号 : P467 ; P333.1 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-3037( 2006 ) 01-0086-06

## 1 引言

分布式水文模型主要研究四类问题 : 径流模拟、模拟气候变化及人类活动对径流的影响、水质和生态模拟、水文过程物理机理研究<sup>[1,2]</sup>。人类活动往往是与土地利用/覆被变化及其伴随变化相联系的 , 在两种方式上影响水循环的过程 : 一种是纯粹的土地利用/覆被变化( LUCC ) , 导致区域的蒸散(发)强度改变 ; 另一种则是由于引水灌溉、水库洼地蓄水、水保工程、人畜饮水等所导致的净消耗水量 , 以上两种方式都以有效或无效蒸发的方式影响着水循环的时间与空间分布。

关于土地利用变化水文响应的分析技术尚处于初期研究阶段 , 而预测未来变化的影响可以说刚刚起步<sup>[3]</sup>。美国农业部水土保持局研制的 SCS 曲线数( CN )方法<sup>[4]</sup> , 被广泛用于不同土壤及土地利用类型的产流量计算。该方法之所以被人们普遍接受并不是因为其精确性 , 而是其简单性。著名的 MIKE SHE 模型<sup>[5]</sup>中 , 通过建立植被截留、流域蒸散(发)与 LAI(叶面积指数)植被根系及土壤含水量特性参数之间的联系 , 描述不同土地利用覆被对水文过程的影响。王建群等<sup>[6]</sup>以秦淮河流域为例 , 将土地利用类型分为地表蓄水体、水稻田、旱荒地和不透水面 , 分别建立相应的产流计算方法 , 分析各种土地利用变化对水资源系统尤其是对水量平衡和防洪情势的影响程度。

植被的水文响应一般是从蒸散(发)的角度来开展研究的。ZHANG Lu 对世界上 250 个流域资料分析得出 , 当给定一个森林覆盖率 , 长期平均蒸散(发)量与降水量存在很好的关

收稿日期 2005-05-08 ; 修订日期 2005-09-08。

基金项目 : 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(CX10G-E01-08) ; 国家自然科学基金项目(50279049)。

第一作者简介 : 王纲胜(1978- ) , 男,湖北鄂州人,博士,主要从事水文水资源研究。

系,他提出一个简单的两参数模型<sup>7</sup>(Rational Function Approach),根据年降水量、潜在蒸散和植被可利用水量系数  $w$  (plant-available water capacity coefficient) 估算实际年蒸散量,其中,不同的植被具有不同的  $w$  值,借此研究不同植被对于流域蒸散(发)及径流的影响。Bagrov 模型<sup>8,9</sup>也是建立实际蒸散与降水和潜在蒸散之间的关系,其中的效力参数  $N$  与土地利用类型和土壤类型有关。

气候变化包括气候的自然波动及人类活动引起的变化,本文描述的是气候要素的自然波动,即年代际之间的变化。气候变化的水文响应研究一般采用两种方式,一种是采用气候模式,如 GCMs(General Circulation Models)和 RCMs(Regional Circulation Models)模拟气候条件,将气候模式中产生的气候变化信号通过降尺度(downscaling)方法转换输入到水文模型中,进行水文模拟<sup>10</sup>;另一种则是利用实际气象数据产生不同的情景,输入到水文模型中进行模拟。气候模式与水文模型的空间尺度存在着差异性。气候变化通常发生在全球或者大陆尺度,往往比水文问题所发生的尺度大得多,因为水文问题通常是在流域的尺度上进行研究。

由于气候变化及人类活动的影响尺度较大,相应的模型尺度也应该扩大。为此,本文在 DTVGM 日模型<sup>11</sup>的基础上,又建立了 DTVGM 月模型。月模型不考虑模型的汇流过程,空间上将整个流域划分为多个子流域,应用改进的 Bagrov 模型估算不同土地利用类型的蒸散(发),并利用模型设置的参数集表述人类活动的水文响应特征。

## 2 DTVGM 月水量平衡模型

DTVGM 分布式月水量平衡模型是在由 DEM 划分的子流域单元上,根据遥感提取的单元下垫面条件,分别计算子流域的产流(分为地表径流与地下径流)、蒸散(发)、土壤含水量变化,分析下垫面变化对径流形成的影响。子流域单元水量平衡可以表示为:

$$\Delta A W_t = A W_{t+1} - A W_t = P_t - ETa_t - RS_t - RSS_t - WU_t \tag{1}$$

式中  $\Delta A W_t$  表示土壤含水量变化; $A W_t$  和  $A W_{t+1}$  分别表示  $t$  时段初和  $t$  时段末( $t+1$  时段初)的土壤含水量; $P_t$  为降水; $ETa_t$  为蒸散(发); $RS_t$ 、 $RSS_t$  分别为地表径流、地下径流(包括壤中流); $WU_t$  为由于引水灌溉、水库洼地、水土保持工程及人畜饮水等导致的净消耗水量,即日模型中提到的取用耗水量。本研究中,由于取用耗水等资料收集与计算困难,将有效蒸散(发)与取用耗水合并成蒸散(发),用一个模型进行计算。

产流计算方法采用分布式时变增益水文模型(DTVGM)的思路<sup>11</sup>,这里重点讨论与 LUCC 有关的单元蒸散(发)计算模型及人类活动背景参数集。

### 2.1 改进的 Bagrov 蒸散(发)模型

本文的单元蒸散(发)模型以 Bagrov 模型<sup>9</sup>为基础,计算由于土地覆被(植被)变化,导致子流域单元蒸散(发)强度发生的变化。Bagrov 方法是一种简单易用的蒸散(发)计算模型,可以表示为:

$$\frac{dETa}{dP} = 1 - \left( \frac{ETa}{ETp} \right)^N \tag{2}$$

式中  $P$  表示降水量; $ETp$  表示潜在蒸散(发); $ETa$  表示实际蒸散(发); $N$  为反映土壤类型及土地利用类型的参数<sup>8</sup>。

式(2)可以变换为:

$$d \left( \frac{ETa}{ETp} \right) = \left[ 1 - \left( \frac{ETa}{ETp} \right)^N \right] \cdot d \left( \frac{P}{ETp} \right) \tag{3}$$

此微分方程采用数值解法进行求解,图 1 是求解得到的  $ETa/ETp-P/ETp$  关系图。

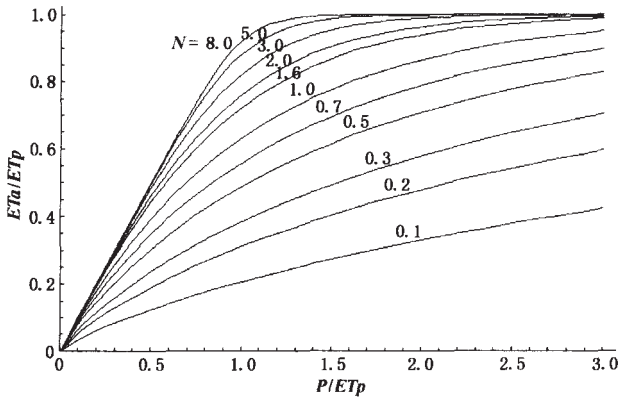


图 1 N 取不同值时的  $ETa/ETp-P/ETp$  关系图

Fig.1 Relationship between  $ETa/ETp$  and  $P/ETp$  with different  $N$

用 Bagrov 模型的形式。修改后的 Bagrov 模型同时考虑前期土壤湿度与降水对蒸散(发)的贡献,也能考虑不同土地利用类型在蒸散(发)计算上的差异。 $KAW$  是流域特性参数,需要在实际应用中进行率定。

### 2.2 人类活动背景参数集

人类活动背景参数集包含 5 个参数,其含义及取值范围见表 1。

表 1 DTVGM 月模型的人类活动背景参数集

Table 1 Parameter set of human activities in the DTVGM monthly model

参数	参数含义	取值下限	取值上限	单位
$g_1$	地表产流系数	0.02	0.40	-
$g_2$	地表产流指数	0.10	3.00	-
$Kr$	地下径流蓄泄系数	0.005	0.100	1/d
$KAW$	蒸散(发)计算参数	0.1	1.0	-
$AW0$	土壤湿度初值	5	30	mm

### 3 DTVGM 月模型的率定与检验

在 DTVGM 月模型中,需要优化 5 个参数,如表 1 所示。目标函数有 2 个:水量拟合指标与效率系数,在优化中将它们合成一个目标函数:

$$OBF=w \times |1.0-WB|+(1.0-w) \times |1.0-NSEC| \tag{5}$$

式中, $WB$  是水量拟合指标,即模拟径流量与实测径流量的比值; $NSEC$  是效率系数, $w$  是水量平衡指标权重,一般取 0.5。该目标函数既考虑了总水量平衡因素,也考虑了过程模拟的效果。

将潮白河流域 1961—1966、1973—2001 年共 35 年的降水、流量和水面蒸发资料,统一处理成逐月数据。其中,白河流域有 43 个雨量站、潮河流域 15 个雨量站的降雨资料,流量站有下会(辛庄)与张家坟(对峪),水面蒸发站有白河下堡、潮河大阁与戴营站。雨量数据通过梯度距离平方反比法(GIDS)<sup>[12]</sup>插值到每个子流域上。

本研究在人类活动影响较弱的情况下分析降雨产流过程,即用 1961—1966 年的资料对模型进行参数的率定与检验。DTVGM 月模型的率定采用 SCE-UA 算法<sup>[13]</sup>。为了检验 SCE-UA 算法的稳健性,采用不同的随机种子进行了 10 次优化模拟。将潮河 10 次优化后的参数均值代入潮河 DTVGM,得到  $WB=1.01$ ,  $NSEC=0.94$ ;代入白河 DTVGM,得到  $WB=0.97$ ,  $NSEC=0.76$ 。将白河 10 次优化后的参数均值代入白河 DTVGM,得到  $WB=1.02$ ,  $NSEC=0.86$ ;代入潮河 DTVGM,得到  $WB=1.07$ ,  $NSEC=0.88$ 。

Bagrov 模型的时间尺度是月或者年,反映了不同下垫面的蒸散(发)与降水的关系,即  $ETa/ETp=f(P/ETp, N)$ 。该模型中只考虑了降水对蒸散(发)的贡献。但是,许多研究表明,实际蒸散(发)与土壤含水量关系密切<sup>[4]</sup>。为此,本文的单元蒸散(发)模型以 Bagrov 模型为基础,通过引入土壤含水量  $AW$ ,用  $KAW \times (AW+P)$  代替  $P$  对 Bagrov 模型进行了合理改进,增强蒸散(发)的水文机理,即:

$$ETa/ETp=f[KAW \times (AW+P)/ETp, N] \tag{4}$$

式中,  $KAW$  为待定的蒸发计算参数;  $AW$  为土壤含水量。函数  $f(\cdot)$  仍然采用 Bagrov 模型的形式。

上述计算结果表明 :两个流域分别优化得到的参数并不完全一致 ,但是都能得到较好的模拟效果 ,说明了存在“ 异参同效 ”的现象 ,即不确定性。利用潮河、白河中任何一个流域的资料进行参数优化 ,然后将参数代入另一个流域中进行模拟 ,均可以得到较为理想的效果 ,说明 DTVGM 月模型中虽然存在不确定性 ,但是不确定性较小 ,而且在潮白河的率定和检验是成功的 ,具有良好的可移植性。

#### 4 潮白河流域气候变化及人类活动的水文响应

本节将利用建立的 DTVGM 月水量平衡模型 ,量化分析华北地区密云水库以上潮白河流域<sup>[14]</sup>气候变化及人类活动对径流变化的影响程度。这里的气候因子主要是指降水和蒸发数据 ;人类活动影响由前面定义的人类活动背景参数集决定。

为了反映人类活动在不同时间段的影响 ,结合实际资料条件( 1961—1966、1973—2001 年共 35 年 ) ,将潮河、白河的径流模拟过程划分为 3 个阶段 :

表 2 径流模拟阶段

Table 2 Runoff simulation periods

阶段	起止年份	时间长度	气候背景(SC)	人类活动背景参数集(SH)
1970 年代以前	1961—1966 ,1973—1979	13a	DataC70 ,DataB70	ParaC70 ,ParaB70
1980 年代	1980—1988	9a	DataC80 ,DataB80	ParaC80 ,ParaB80
1990 年代	1989—2001	13a	DataC90 ,DataB90	ParaC90,ParaB90

注 :DataC、DataB、ParaC、ParaB 中最后一个字符“ C ”、“ B ”分别代表潮河流域、白河流域。

表 3 气候变化与人类活动对径流变化的贡献率

Table 3 Contribution rates of climate changes and human activities to runoff changes

		气候影响		人类活动影响		
潮河 1980 年代与 1970 年代以前相比	DataC70	DataC80	DataC70	DataC80		变化/余额
	ParaC70	ParaC70	ParaC80	ParaC80		
年平均降雨量/mm	实测	494.21		458.83		-7.16%
年平均径流深/mm	实测	79.57		39.75		-50.04%
	模拟	79.51	70.18	49.73	39.75	
模拟值变化量/mm			-9.33	-29.78	-39.75	-0.64
模拟值变化百分比(贡献率/%)			-23.46	-74.92	-100	-1.62
影响			减少径流	减少径流		
		气候影响		人类活动影响		
白河 1980 年代与 1970 年代以前相比	DataB70	DataB80	DataB70	DataB80		变化/余额
	ParaB70	ParaB70	ParaB80	ParaB80		
年平均降雨量/mm		475.04		441.08		-7.15%
年平均径流深/mm	实测	75.13		34.79		-53.69%
	模拟	75.13	57.13	52.01	34.76	
模拟值变化量/mm			-17.82	-23.12	-40.38	0.57
模拟值变化百分比(贡献率/%)			-44.14	-57.27	-100	1.41
影响			减少径流	减少径流		

对于气候变化( SC )与人类活动( SH )这两个影响因子 ,采用固定一个因子改变另外一个因子的方法来计算变化因子对径流的影响程度<sup>[15]</sup>。部分计算分析结果见表 3。

( 1 )潮河 1980 年代与 1970 年代以前相比 :潮河 1970 年代以前( 以下简称“ 1970 年代 ” )模拟径流深为 79.51mm ,1980 年代为 39.75mm ,1980 年代比 1970 年代减少了 39.75mm。当人类活动影响背景参数集保持为 1970 年代的 ParaC70 ,气候背景因子变为 1980 年代的数据 C80 时 ,导致模拟径流变化为 70.18mm ,减少 9.33mm ,占整个变化( 39.75mm )的 23.46% ,即气候变化贡献率为 23.46% ;当气候背景因子保持为 DataC70 ,人类活动影响背景参数集变

为 ParaC80 时,导致径流变为 49.73mm,减少 29.78mm,占整个变化的 74.92%,即人类活动贡献率为 74.92%;当两个因子都改变,即采用 DataC80 和 ParaC80 时,比 1970 年代(DataC70 和 ParaC70)的径流深减少 39.75mm。关于 3 个变化量之间的差值( $-0.64=-39.75+9.33+29.78$ ),文献[15]认为可以解释为由于模型误差或其它条件的变化所引起,该项误差或变化导致的径流变化率为 $-1.62\%$ 。事实上,除非是简单的线性模型,这个差值的存在是必然的。这个差值是由于气候及人类活动背景参数集同时变化所产生的综合效应增量(正效应或负效应),当然也有部分是模型计算误差导致的。

(2) 白河 1980 年代与 1970 年代以前相比:年平均降雨量减少 7.15%,径流则减少 53.69%。气候变化与人类活动均导致径流减少,而且人类活动的贡献率(57.27%)稍大。

另外,潮河 1990 年代与 1970 年代以前相比,年平均降雨量略有减少(3.09%),但是径流减少了 33.63%。气候变化与人类活动均导致径流减少,但是人类活动的贡献率(73%)更大。白河 1990 年代与 1970 年代以前相比,年平均降雨量减少 4.05%,径流则减少 52.18%。气候变化与人类活动均导致径流减少,而且人类活动的贡献率(54%)稍大。

## 5 结论

DTVGM 月水量平衡模型可以定量识别气候变化及人类活动对径流变化的贡献。在密云水库以上潮白河流域,不同阶段之间径流量的变化幅度远大于降雨量的变化幅度,说明除了气候变化的影响,人类活动造成的土地利用变化及其伴随的变化也是造成径流减少的原因。在白河流域,人类活动与气候变化对径流减少的贡献率相当;而在潮河流域,径流减少的主要原因是人类活动的影响。

## 参考文献(References):

- [1] Abbott M B, Refsgaard J C. Distributed Hydrological Modelling [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. [XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian. Distributed Watershed Hydrological Models. Beijing: Chinese Water Resources and Hydropower Press, 2004.]
- [3] Beven Keith J. Rainfall-Runoff Modeling [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [4] Thompson S A. Hydrology for Water Management [M]. Rotterdam: A A Balkema, 1999.
- [5] 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: 34-50.
- [6] 王建群, 卢志华. 土地利用变化对水文系统的影响研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 292-298. [WANG Jian-qun, LU Zhi-hua. Study on the impact of land use changes on the hydrological system. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(2): 292-298.]
- [7] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [8] Jankiewicz P, Glugla G, Rachimow C, et al. The mean annual actual evapotranspiration for the Hydrological Atlas of Germany (1961-1990) [EB/OL]. <http://www.zamg.ac.at/DACH2001/dachneu/Session9/a/Poster/jankiewi.pdf>. 2001.
- [9] Terpstra J, A van Mazijk. Computer aided evaluation of planning scenarios to assess the impact of land-use changes on water balance [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, 26(7/8): 523-527.
- [10] Jan C van Dam. Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes (International Hydrology Series) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [11] 王纲胜, 夏军, 朱一中, 等. 基于非线性系统理论的分布式水文模拟[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 521-525. [WANG Gang-sheng, XIA Jun, ZHU Yi-zhong, et al. Distributed hydrological modeling based on nonlinear system approach. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 521-525.]
- [12] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56. [LIN Zhong-hui, MO Xing-guo, LI Hong-xuan, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China. *Acta*

- Geographica Sinica*,2002,57(1): 47–56.]
- [13] Duan Q,S Sorooshian,V K Gupta.Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J].*Jour. of Hydrol.*,1994,158:265–284.
- [14] 夏军,刘孟雨,贾绍凤,等.华北地区水资源与水安全问题的思考与研究[J].自然资源学报,2004,19(5):550–560.[XIA Jun,LIU Meng-yu,JIA Shao-feng,et al.Water security problem and research perspective in North China.*Journal of Natural Resources*,2004,19(5):550–560.]
- [15] 张蕾娜.白河流域土地覆被变化水文效应的分析与模拟[D].北京 :中国科学院研究生院,2004.[ZHANG Lei-na.Analysis and Simulation of Hydrological Impacts of Land Cover Changes on the Bai River Basin.Beijing:Graduate School of the Chinese Academy of Sciences,2004.]

## A Distributed Monthly Water Balance Model for Identifying Hydrological Response to Climate Changes and Human Activities

WANG Gang-sheng<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>1,2</sup>, WAN Dong-hui<sup>2</sup>, YE Ai-zhong<sup>2</sup>

(1. Key Lab. of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. State Key Lab. of Water Resources & Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A blueprint (FH69 blueprint) for a physically-based digitally simulated hydrologic response model was published by Freeze and Harlan in 1969, which initiated the studies on the distributed hydrological models (DHMs) at the watershed scale. Nevertheless, in spite of three decades of modeling development, distributed hydrological models are today being used in practice only at a fraction of their potential. The applications of DHMs based on the FH69 blueprint are confronted with difficulties because of deepening in theory, which simultaneously indicate that the complex models are not always good ones. According to the scientifically modeling protocol, a simple monthly subbasin-based water balance model is put forward, where the revised Bagrov evapotranspiration model is developed to parametrize the distinguishes between various land covers, and a parameter set is introduced to represent the impacts of human activities on runoff generation and evapotranspiration processes. In the case study of the Chaobai River Basin in North China, the model was used to quantitatively identify the impacts of climate changes and human activities on runoff. In the Bai River Basin, the annual mean precipitation of the 1980s (1980–1988) and 1990s (1989–2001) decreased by 9% and 5% compared with that of the 1970s (1961–1966 and 1973–1979), but the runoff reduced by 54% and 52% respectively. The simulation results indicate that the contribution rates of climate changes and human activities are 44% and 54% respectively. In the Chao River Basin, such contribution rates are 24% and 74%, i.e., human activities are the main reason for runoff decrease.

**Key words :** monthly water balance model; climate changes; human activities; Chaobai River Basin ; North China