

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20160313

· 研究报告 ·

土地利用/覆盖变化对永定河流域水文过程的可能影响模拟^{*}

胡华浪¹, 李伟方^{1*}, 易湘生¹, 王 宏²

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要 客观认识土地利用的空间配置对水资源空间变化的影响, 揭示区域特殊的水土耦合关系, 为流域水土资源合理利用提供重要的科学决策依据。文章利用 1978、1987、2000 和 2005 年土地利用类型图、土壤类型图和 1970~2006 年气候数据, 基于 SWAT 模型, 模拟了永定河流域的 1981~1991 年的月径流变化情况, 并对模拟的结果进行了精度评价, 在设定保持前一期气候不变情况下, 根据不同土地利用/覆盖变化情景, 模拟了径流过程, 分析了土地利用/覆盖变化对平均流量的可能影响程度, 结果表明: 模型模拟结果精度已达到了模型应用的要求精度, 而对土地利用/覆盖变化对水文影响研究中, 1970s~2000s 土地利用/覆盖变化对径流的可能影响程度最大, 为 23.33%, 1980s~1990s 影响程度最小, 为 9.69%, 气候变化对流域的水文的可能影响程度达到了 75% 以上。总体看来, 土地利用对流域的水文过程影响程度较低, 制约水文变化的主要因素是气候。

关键词 土地利用/覆盖变化 水文 SWAT

中图分类号: F323.211; F323.213; F327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9121[2016]03-0074-10

0 引言

土地覆盖变化的研究是全球变化研究与现代地学领域的一个核心和热点^[1], 是指自然与人工营造地表覆盖状况^[2], 土地利用/覆盖变化直接体现与反映了人类活动对环境的影响水平, 其在不同程度上改变土地的覆被状态(如水旱农作物、林草、建设用地等), 覆盖状态的变化一方面影响地表植被的截留量和流域的蒸发散性能, 另一方面通过地表覆被类型及程度的改变显著影响土壤的入渗特征, 进而影响流域地下水形成, 流域的水文情势和产汇流机制, 增大了流域洪涝灾害发生的频率与强度, 进而影响到以土地为下垫面的水文循环、水资源形成过程及水质的改变。最终结果直接导致水资源供需关系发生变化, 从而对流域生态与社会经济发展等多方面具有显著影响, 产生一系列的水资源、生态环境问题, 表现为地下水补给减少、水位下降、水资源短缺、湿地退化等^[3-8]。由于土地利用通过影响下渗、蒸发散等水文过程而影响径流的时间与空间变化, 对流域水文环境、水文过程、水文通量、水量平衡、水文化学及流域生态系统动态都会产生十分重要的影响^[9-10], 因而土地利用/覆盖变化对生态水文过程的影响一直是研究热点之一。

为了揭示植被-土壤-水文相互作用的机理, 模拟生态水文过程, 分析与预测流域自然资源管理与全球变化对水文循环的影响, 开发了大量的水文模拟模型。根据模型参数在空间尺度上概化的特点可以把水文模型分为: 基于概化与相似性假设(即物理环境相似的流域对相同的降水输入具有相似的水文响应)的传统工程水文学集总式参数模型和基于水文过程物理的分布式参数模型^[11]。集总式模型忽略了各部分

收稿日期: 2015-10-19

作者简介: 胡华浪(1980—), 男, 江苏涟水人, 工程师、副站长。研究方向: 农业遥感、资源环境遥感及农村土地确权。*通讯作者: 李伟方(1958—), 男, 山东寿光人, 高级工程师、副院长。研究方向: 农业遥感与农业规划。Email: wfli1988@aliyun.com

***资助项目:** 国家科技支撑计划“贫困地区灾害风险评估与灾害管理技术”(2012BAH33B02)

流域特征参数在空间上的变化,把全流域作为一个整体。分散模型按流域各处地形、土壤、植被、土地利用与降水等的不同,将流域划分为若干个水文模拟单元,在每一个单元上用一组参数反映该部分的流域特性^[12]。与集总式水文模型相比,分布式水文模型具有以下优点:(1)评价与预测土地利用变化等对水文情势的影响;(2)预测水文系统对具有空间变化特征的输入变量的输出特点;(3)预测污染物与泥沙的迁移;(4)预测没有实测水文气象资料流域的水文情势;(5)揭示景观异质性对于维护景观格局与过程影响机制^[11]。因此,分布式水文模型是未来水文模拟模型的发展方向。流域内部的地形、地貌、地质、植被、土壤、气象等基本要素一般是不同的,其相应的水文过程也各异。分布式水文模型具有2个特点:(1)具有严格的物理基础;(2)参数是具有空间分布的。2个特点决定了分布式水文模型可以充分考虑流域地理要素对水文过程的影响,同时考虑流域内的水文过程间的相互作用与流域内部地理要素的空间分布格局对流域水文的影响。因此,分布式水文模型能反映流域内的局部变化所产生的水文效应,可以模拟与评价流域管理活动对流域水文状况与水资源的影响。然而,分布式水文模型运行要求的大量的数据,而往往许多流域的数据不全或缺失,为模型运行带来很大的困难,最后,缺失的数据只能靠模型模拟来弥补,而模拟的数据存在较大的误差,为整个水文过程模拟带来很大的不确定性,因此,积累大量的水文数据是利用分布式水文模型模拟水文物理过程的重要基础工作之一。

1994年,美国农业部农业研究服务中心(ARS, Agricultural Research Service)为了模拟预测土地利用、土地经营管理方式对流域水量、水质等方面的影响,开发了SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式流域水文模型,具有很强的物理机制,可利用遥感与地理信息系统提供的空间信息,模拟多种不同的水文过程,如水量、水质以及杀虫剂的输移与转化过程^[13]。利用美国农业部水土保持局SCS模型或Green&Ampt下渗概念模型计算产流,在SCS模型中,引入了反映降水前流域特征的无因子参数CN(curve number),是土壤类型、土地覆盖、土地利用、耕作方式及前期土壤湿度的函数,应用较多的CN值是1972和1986年根据北美的实验资料确定的。模型在以前不同土地利用类型与土壤类型的小流域降雨-径流关系的研究基础上,得到了降水径流的经验方程。由于该经验模型在降雨-径流关系上考虑了土地覆盖、土壤、坡度等下垫面因素,将径流与流域的土地覆盖直接联系起来,采用多种方法将流域离散化,能够响应降水、蒸发等气候因素与下垫面因素的空间变化、人类活动对流域水文循环的影响^[14-16]。1995年,Grayson等提出了THALES模型,它是一个基于矢量高程数据的分布式参数模型^[17]。Yao等提出了基于网格的集降雨空间输入估计、降雨-蒸发-径流过程模拟、河流演算及空间参数校准为一体的分布式水文模型^[18]。Yang等^[19]提出了基于山坡的与基于10km网格的大尺度分布式水文模型(GBHM)。此外,USGS模型^[20]、WATFLOOD模型^[21]、SLURP模型^[22]及PRM模型^[23]等都属于分布式水文模型的范畴。还有一些与GCM耦合的大尺度分布式水文模型,如VIC模型^[24]。陈军锋等^[11]针对长期以来关于森林的水文效应的争论,选择了长江上游的一个中等流域,分析其40年来的气候波动与土地覆盖变化情况,利用集总式与分布式水文模型分别模拟了该流域气候波动与土地覆盖变化对其水文的影响,得出由于气候波动造成的径流的变化占3/5~4/5,由于土地覆盖变化所造成的径流的变化占1/5等结论。陈利群等^[25]采用SWAT和VIC分布式水文模型分析了1960~2000年黄河源区土地覆被对径流的影响,表明土地覆被变化对径流影响大致为6%~16%,生态退化与冻土融化等的水文效应大约为14%~20%。

该文利用SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式水文模型,模拟了永定河流域的月径流变化,对模拟结果进行了评价,并分析了土地利用/覆盖变化对径流过程的影响,对客观认识土地利用的空间配置对水资源空间变化的影响,揭示区域特殊的水土耦合关系,流域水土资源合理利用具有重要的意义。

1 研究区概况

永定河流域处于东经111°35'~117°12',北纬41°30'~38°35'。流经山西、内蒙古、河北、北京、天津等5个省(市)。研究位置如图1所示。永定河上游主要包括山西省大同与朔州地区、河北省张家口地

区。大同和朔州地区气候类型属于温带大陆性季风气候,夏季受跨越华北丘陵山地与太行山、恒山的东南湿热季风影响,冬季则受亚洲内陆高压中心的控制,西北寒冷干燥的高气压流入侵。因此,四季分明,冬季寒冷干燥,晴朗少雪,多强劲的西北风;夏季温暖、湿润、多雨,降水集中,多温湿偏南风,雨热同季;春季干旱风大,春温高于秋温,秋雨多于春雨。该区日照较充足,全年日照时数除山阴、浑源少于 2 800h 外,其余县均在 2 800 ~ 3 000h 之间,是全国日照时数较多的地区之一。

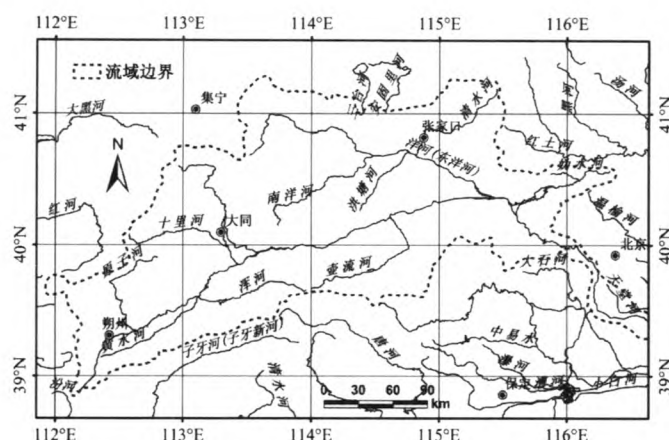


图1 研究区位置

2 模型和数据

2.1 模型

因为永定河流域水文特征变化复杂,流域受人类活动影响很大,因此,选择具有很强的物理机制,考虑了人类活动用水的 SWAT 模型模拟永定河流域的水文过程。SWAT 模型可以模拟水量、水质及杀虫剂的输移与转化过程,预测土地利用、土地经营管理方式等对流域水量、水质等生态水文过程的影响效应。

SWAT 模型模拟水分循环是建立在水量平衡方程的基础上。水量平衡方程如下^[26-27]:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

SW_t 表示土壤最终含水量 (mm), SW_0 表示土壤起始日期含水量 (mm), t 时间 (d), R_{day} 为第 i 天降水量 (mm), Q_{surf} 表示第 i 天的地表径流 (mm), E_a 表示第 i 天的蒸发量 (mm), w_{seep} 表示第 i 天存在于土壤剖面底层的渗透量与侧流量 (mm), Q_{gw} 表示第 i 天的基流量 (mm)。

2.2 数据

2.2.1 DEM

论文采用的 DEM 空间分辨率为 90m, 投影类型为 UTM。

2.2.2 气象数据

利用永定河流域内大同、蔚县、张家口及怀来 4 个气象站与流域外 7 个气象站 1958 ~ 2006 年日降水量、日均温、日最大及最小温度、日平均风速、日相对湿度数据及 10 个气象站 1958 ~ 2006 年日总、净辐射数据,从《海河流域水文资料》中获得流域内 10 个水文站的日降雨量数据。

2.2.3 土地利用数据

利用 MSS、TM、ETM + 影像,通过监督与非监督分类,得到永定河流域 1978、1987、2000 及 2005 年 4 期土地利用类型图。对所有的土地利用类型图重采样,得到与 DEM 相同的空间分辨率。土地利用类型总分为 7 类:农田、居民地和工矿、交通用地、水体、林地、草地、未利用地,分别与对应于 SWAT 模型土地利用/覆盖数据库中的, Agricultural land-Row Crops (中耕农作物)、Residential-Medium Density (中密度居民地)、Transportation (交通)、Water (水体)、Forest-Deciduous (落叶林)、Pasture (草地)。由于 SWAT 数据库中各植被类型的参数是在美国流域的实验基础上设定,某些参数的数值(如生物量、LAI 等)并不适用于永定河流域,需要根据流域的实际情况重新设置参数。在 SWAT 模型数据库没有与未利用地类型对应的土地利用类型,因此,在数据库中增加 1 类: Unused land。

2.2.4 土壤数据

模型所需的土壤数据包括土壤图形数据与属性数据。图形数据通过数字化 1:100 万纸质图得到研究区土壤类型矢量图,流域土壤类型图中的土属共 144 类。

SWAT 模型需要大量的土壤属性数据, 每种土壤类型需要的属性有: (1) 土壤层数; (2) 每类土壤所属的水文分组, 模型将土壤分为 4 组 (A, 土壤有高的渗透率; B, 土壤有中等的渗透率; C, 土壤有较低的渗透率; D, 土壤有极低的渗透率); (3) 土壤剖面的植物最大根系深度; (4) 孔隙度。除过需要输入上述的几种属性之外, 又要根据不同的土壤分层, 需要输入不同土壤层的相应属性, 包括: 土壤表面到土壤层的深度、土壤容重、有效田间持水量、饱和导水率、有机 C 含量、粘粒、粉沙、沙粒、砾石含量的百分比与土壤反射率。

根据《雁北地区土壤》资料, 可获得每种土属的土壤层数、土壤部面植物的最大根系深度, 孔隙度、土壤表面到土层的深度, 有机 C 含量、粘粒、粉沙、沙粒、砾石含量的比例。土壤容重是利用铝盒进行野外采样, 然后在实验室分析得到。因为根据从资料中得到的机械组成的范围为 $<0.01\text{mm}$ (%) 与 $<0.001\text{mm}$ (%), 而 SWAT 模型中所用的机械组成是美国标准, 其范围为粘粒 ($<0.002\text{mm}$)、粉粒 ($0.002\sim0.05\text{mm}$) 和沙粒 ($>0.05\text{mm}$), 因此, 需要将资料中得到的机械组成转化成与美国标准相同的范围。张楠等^[28]研究表明, 利用三次样条函数插值的组合来实现粒径级配转换效果较好, 可以满足模型对土壤粒径分级的要求。因此, 参考已有的研究, 利用三次样条函数, 实现将现有范围的土壤粒径转成美国制。

由于土壤质地含量与土壤物理属性之间存在较好的统计关系, 利用反映这种关系的软件可以估算土壤的物理属性。利用美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW 中的 Soil-Water - Characteristics (SWCT) 模块, 根据粘土 (Clay)、砂 (Sand)、有机物 (Organic Matter)、盐度 (Salinity)、砂砾 (Gravel) 等参数可以计算出: (1) 凋萎系数 (Wilting Point, % vol); (2) 田间持水量 (Field Capacity, % vol); (3) 饱和度 (Saturation, % vol); (4) 土壤容重 (Bulk Density, g/cm^3); (5) 饱和导水率 (Sat. Hydraulic Cond, cm/h), 由田间持水量与凋萎系数的差值可以得到每层土壤的有效持水量 (SOL_ AWC)^[29]。因此, 利用经过转化后的美国制的机械组成与从《雁北土壤》中获取的有机质含量等, 产生对应土壤的有效含水量、土壤饱和和传导率、田间持水量、凋萎土壤含水量, 建立起 SWAT 模型所需的流域土壤属性数据库。

2.2.5 水库数据

由于永定河流域水库较多, 在利用模型模拟水文过程时, 必须考虑水库的调蓄作用。因为水库资料缺乏, 在模拟时, 主要考虑了 3 个水库: 东洋河友谊水库、桑干河册田水库及官厅水库, 各水库的基本情况如表 1 所示。

表 1 水库的基本情况

水库	所在河流	控制面积 (km^2)	库容 (万 m^3)			
			总库容	兴利库容	死库容	已淤积库容
册田	桑干河	16 700	58 000	5 700	36 000	17 900
友谊	东洋河	2 250	11 600	5 870	620	1 630
官厅	洋河、桑干河、奶水河	43 000	416 000			58 000

根据海河流域水文资料各水库的日出流量, 获得每月的平均最大和最小出流量, 如表 2 所示。

3 永定河水文过程的模拟

3.1 流域数字化描述

首先输入研究区的 DEM, 建立 SWAT 模型中的 DEM, 基于此 DEM, 进行填洼运算。然后设定最小面积阈值, 提取永定河流域范围与河流, 最小面积阈值根据 SWAT 模型的建议值然后不断调整初始大小, 将提取的河流与已数字化的矢量河流比较, 最后选定一个阈值, 使得提取的河流与已有的矢量河流相吻合, 在该研究中, 最小面积阈值为 3.5万 hm^2 。

表 2 每月的日平均最大出流量和最小出流量

时间 (月)	出流量 (万 m ³)					
	册田水库		友谊水库		官厅水库	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
1	47.87	0	10.28	0.35	169.34	36.12
2	67.305 6	0	241.92	0.345 6	166.75	33.43
3	211.68	0	216.00	0.172 8	257.47	31.19
4	313.632	0	171.072	0.172 8	628.99	51.24
5	1 183.68	0	241.92	0.216	807.84	52.36
6	516.672	0	183.168	0.216	872.64	54
7	46 448.64	0	374.976	0.259 2	796.61	40.87
8	1 745.28	0	338.688	0.259 2	739.58	13.57
9	1 883.52	0	635.04	0.432	369.79	30.15
10	282.528	0	75.513 6	0.086 4	317.95	36.29
11	113.184	0	177.984	0.345 6	199.58	56.85
12	71.193 6	0	15.638 4	0.345 6	181.44	33.69

定义流域出口,划分子流域,模型将流域划分为 81 个子流域,计算各子流域的参数。在相应的子流域中分别加入册田、友谊和官厅水库。提取的河流、划分的子流域及水库位置。

3.2 水文响应单元的划分

在模型中输入流域的土地利用与土壤类型分布图,并分别输入土地利用图与土壤类型图的属性表,进行叠加分析。然后选定 Multiple Hydrologic Response Units (多水文响应单元)方法,设定土地利用类型占子流域面积比例的最小阈值与土壤类型占该子流域中每种土地利用类型的比例的最小阈值。2 种阈值的大小分别设为 5% 与 10%,然后划分各子流域的水分响应单元。

3.3 SWAT 模型数据库

将前面已经建立的土壤理化属性数据、土地利用类型数据、用户气象数据输入 SWAT 模型数据库。把各水库每月的平均日出流数据输入水库数据库中。由于流域内人口生活用水、农业灌溉用水及工业用水较多,必须考虑由于用水而从流域损失的水量。因此,在人口密度高、矿区较多、农业发达的子流域中,在相应的子流域数据库中分别输入因用水从河道、浅水层和深水层损失的水量。

3.4 SWAT 模型运行

降雨分布选择偏正态分布,以日降雨、CN 径流曲线及日汇流方式进行径流模拟;采用 Penman-Monteith 方法计算潜在蒸散;河道汇流选择莫司金干洪水演进法 (Muskingum routing method)。模拟的尺度为月。

3.5 SWAT 模型参数率定

已有的研究表明,径流曲线数 (CN)、土壤有效含水量 (SOL_ AWC)、土壤蒸发补偿系数 (ESCO)、地下水再蒸发系数 (GW_ REVP)、植物蒸发补偿系数 (EPCO) 等参数对月平均流量有较大影响,进行参数率定时,可以调整这些参数,得到较好的模拟结果^[30]。地表产流随 CN 值增加而增大。SOL_ AWC 是土壤植物可利用水量,指土壤从田间含水量到植物永久凋萎点时释放的水分, SOL_ AWC 值增加,表明土壤的保持水能力增强,流域的流量降低,如果 ESCO 增加,会导致深层土壤对上层土壤的补偿水量减少,从而减小土壤蒸发量,而随着土壤蒸发的减少,能够形成产流的水量增加,最终导致坡面流、壤中流与地下流均有所增加,显然总径流量也会提高。GW_ REVP 表示水由浅层含水层返回地表土壤层或植物根区与植物根系吸收,值越大表明由浅层水流向地表土壤层或植物根系层的可能性越大,对地下水产生影响的影响较大。

由以上分析可以看出,进行参数率定时,可以调整上述地表径流对其响应敏感的参数,达到一个较好的模拟结果。利用 1978 年土地利用类型图,土壤类型图,1970~1980 年降水量、气温、风速、相对湿度、太阳辐射、水库库容及流量等数据,模拟了 1970~1980 年流域雁翅水文站的月平均流量。在此基础上,调整敏感参数,进行参数率定。各参数最后率定的结果如表 3 所示。

表 3 参数率定

Parameters	参数	参数取值下限	参数取值上限	可允许的调整范围	调整值
GW_ REVP	地下水再蒸发系数	0.02	0.2	-100%~100%	+0.1
ESCO	土壤蒸发调节系数	0	1	0~1	-0.1
CN	径流曲线数	35	98	-8~8	-8
SOL_ AWC	土壤有效含水量	0	1	-0.05~0.05	+0.04
ALPHA_ BF	地下水退水系数	0	1	-25%~25%	0.2

经过参数率定后,1970~1980 年降水量、月观测径流量及模拟径流量如图 2 所示。为了检验参数率定后模型模拟的精度,利用相对误差、效率系数及相关性分析评价模型的有效性。相对误差的计算公式如下:

$$RE = (R_s - R_o) / R_o \times 100\% \tag{2}$$

R_s 和 R_o 分别为流量的模拟值与观测值, RE 越接近 0,表明模拟的精度越高。同时,利用 Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 检验模型模拟值和观测值之间的拟合度,效率系数的公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_o - R_s)^2}{\sum_{i=1}^n (R_o - R_{oaverage})^2} \tag{3}$$

公式中, $R_{oaverage}$ 为观测值的平均值。当 $R_o = R_s$ 时, $E_{ns} = 1$,表明模型模拟径流达到最理想的精度,大于 0.90 为甲等,0.70~0.89 为乙等,0.50~0.69 为丙等。如果 E_{ns} 为负值,表明精度极低,不能用此模型模拟的结果说明流量的变化情况。根据率定后模拟值与观测值,计算的相对误差为 13.8%,效率系数为 0.606。为了更清楚表明每年观测值与实测值的相关性,观测值与实测值的散点图如图 3 所示,相关性系数达到了 0.8 以上,显著性水平小于 0.000 1,表明月平均流量的模拟值与实测值有显著的相关性水平。

3.6 SWAT 模型模拟结果验证

利用 1987 年土地利用类型图与 1981~1991 年降水量、气温、风速、相对湿度、太阳辐射、水库库容和流量等数据,模拟了这 11 年的月平均流量。降水量、观测及模拟径流量如图 4 所示。计算相对误差为 10.3%,效率系数为 0.603。表明验证期模拟的结果精度与率定期精度差别较小。

模拟的月径流量与实测月径流量进行相关性分析,如图 5 所示。相关系数为 0.81,通过了 0.01 置信水平的检验,表明 1981~1991 年观测月平均流量与模拟月平均流量的相关性较好,模拟结果达到了模型

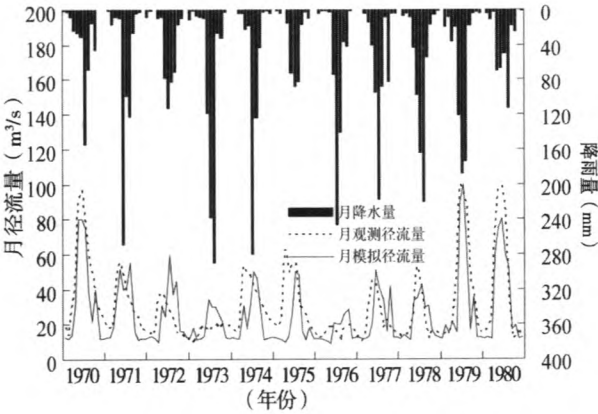


图 2 1970~1980 年参数率定期观测值与模拟值比较

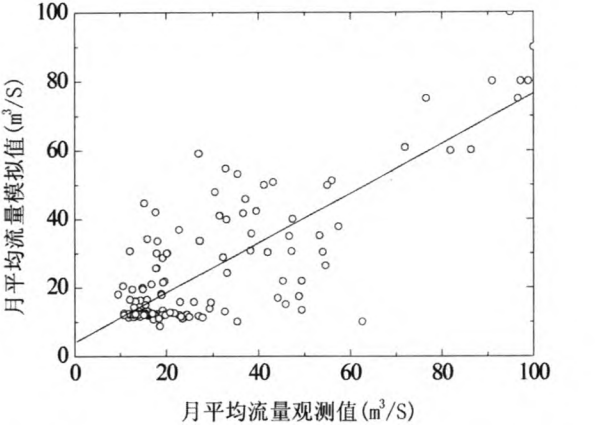


图 3 1970~1980 年月平均流量观测值与模拟值的相关性分析

应用的基本要求精度。

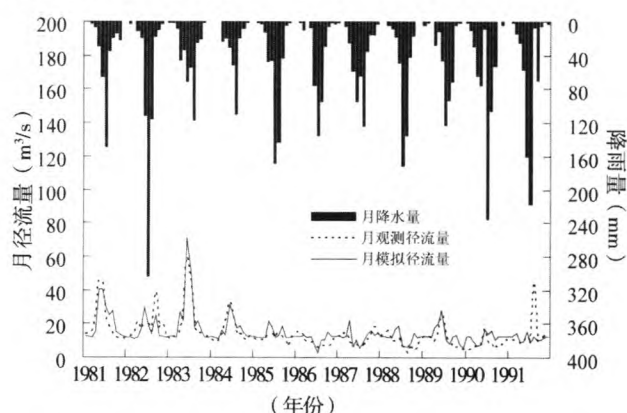


图4 1981~1991年验证期观测值与模拟值比较

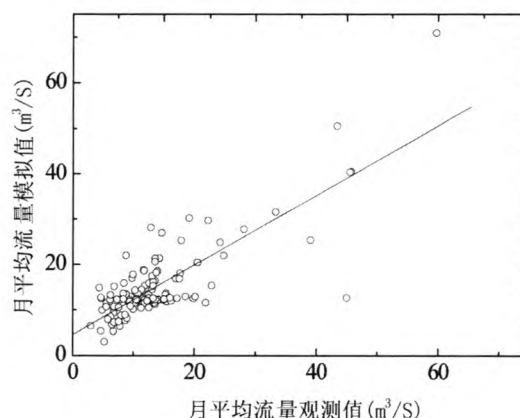


图5 1981~1991年月平均流量观测值与模拟值的相关性分析

从率定期与验证期的模型模拟精度可以看出,率定期的相对误差为13.8%,验证期的相对误差为10.3%,说明模型模拟的相对误差较大。2个时期模型的效率系数分别为0.606与0.603,只达到了丙等。从观测值与模拟值的散点图发现,有个别月平均流量的误差较大。从以上分析可以看出,模型模拟精度处于一般的水平,并没有达到一个较好的模拟结果。从参数率定期与验证期,降水量与观测径流量的关系,某些年份,在降水量大的月份,观测径流量较小,并没有随降水量的增加而增大,在这些月份中,径流量的变化特征与降水量没有表现出一致性,这是因为流域的水库较多,对流量的调节作用较大,在干旱的春季与冬季,尽管流域的降水量少,某些月份的流量出现较高值,模型模拟水库数据时,出现误差。同时,流域的人口、农业及工业用水量很大,而且不同时间用水量有较大的变异性,而在模型中输入的用水量仅仅是各月子流域的多年平均值,并且各子流域浅水层与深水层的多年平均用水量难以估计,因此,导致模型模拟的部分结果与观测值产生偏差。尽管计算的模型模拟精度达到了要求,但模拟结果没有达到一个更好的精度。

4 结果分析

在保持气候与其它条件不变的状态下,通过改变土地利用/覆盖类型,可以估算土地利用/覆盖变化对水文过程的影响程度。同时,通过改变不同时期的气候条件,保持土地利用与其它条件不变,可以分离出不同时期气候变化对水文过程的影响程度。利用率定的SWAT模型,在保持前一时气候不变,而土地利用/覆盖变化的条件下,模拟流域径流的变化。气候不变、土地利用变化的情景设定如表4所示,S1情景:前一期土地利用与前一期气候;S2情景:后一期土地利用与前一期气候;S3情景:后一期土地利用与后一期气候。在气候不变情景下,土地利用/覆盖变化前后的径流深之差、气候与土地利用/覆盖同时变化前后的径流深之差的比, $(S2-S1)/(S3-S1) \times 100\%$,即为土地利用/覆盖变化对径流的可能影响程度。从表4中可以看出,1970s~1980s,土地利用/覆盖变化对径流的可能影响程度为13%,1980s~1990s的可能影响程度较小,为9.69%,1990s~2000s,土地利用对水文的影响程度达到了17.95%。利用1978年的土地利用、1970s的气候与2005年土地利用、2001年以后的气候分析了土地利用/覆盖变化对1970s~2000s年径流的可能影响程度,表明影响程度达到了23.33%。从而可以看出,土地利用/覆盖变化对水文影响程度最大的为23.33%,最小的为9.69%,气候变化对流域的水文的可能影响程度达到了75%以上。总体看来,土地利用对流域的水文过程影响程度较低,制约水文变化的主要因素是气候。

根据1970s~1980s不同土地利用情景下的平均流量可以看出,在气候保持不变情景下,土地利用/覆盖变化前的平均流量为 $25.3\text{m}^3/\text{s}$,土地利用/覆盖变化后的平均流量为 $26.55\text{m}^3/\text{s}$,表明1980s的平均径流量比1970s的径流量有所增加,原因是1970s的有林地和灌木林地分别占流域面积18.90%和48.06%,

表4 不同土地类型情景下的平均径流量与径流深

时段	情景	平均径流量 (m ³ /s)	径流深 (mm)
1970s ~ 1980s	S1: 1978 年土地利用和 1970s 气候	25.3	18.77
	S2: 1987 年土地利用, 1970s 气候	26.55	19.70
	S3: 1987 土地利用, 1980s 气候	15.67	11.63
	(S2-S1) / (S3-S1) × 100%		13.00%
1980s ~ 1990s	S1: 1987 土地利用, 1980s 气候	15.67	11.63
	S2: 2000 年土地利用, 1980s 气候	16.42	12.18
	S3: 2000 年土地利用, 1990s 气候	23.41	17.37
	(S2-S1) / (S3-S1) × 100%		9.69%
1990s ~ 2000s	S1: 2000 年土地利用, 1990s 气候	23.41	17.37
	S2: 2005 年土地利用, 1990s 气候	23.48	17.42
	S3: 2005 土地利用, 2001 ~ 2006 年气候	23.8	17.66
	(S2-S1) / (S3-S1) × 100%		17.95%
1970s ~ 2000s	S1: 1978 年土地利用和 1970s 气候	25.3	18.77
	S2: 2005 年土地利用, 1970s 气候	25.65	19.03
	S3: 2005 土地利用, 2001 ~ 2006 年气候	23.8	17.66
	(S2-S1) / (S3-S1) × 100%		23.33%

到 1980s, 占流域面积的比例分别为 13.64% 和 30.41%, 两种类型面积下降了 5.26% 与 17.65%, 导致产流增加。1980s ~ 1990s, 天然林地与灌丛面积依然大幅减少, 到了 1990s 末期, 林地和灌丛面积分别减少至 5.80% 和 14.60%, 由于流域的林地与灌丛面积的大幅度减少, 导致产流呈增加趋势。从 2000 年以后, 由于国家退耕还林政策的影响, 林地面积有所增加, 但灌丛面积呈减少的趋势, 因此, 2000s 的平均流量并没有随林地的面积增加而减少, 而是呈逐渐的趋势, 但增加幅度较小。

5 结论和讨论

5.1 结论

利用 1978 年、1987 年、2000 年和 2005 年土地利用类型图、土壤类型图及 1970 ~ 2006 年气候数据, 基于 SWAT 模型, 模拟了永定河流域的 1981 ~ 1991 年的月径流变化情况, 对模拟的结果进行了精度评价, 率定期的相对误差值为 13.8%, 效率系数为 0.606, 验证期的相对误差为 10.3%, 效率系数为 0.603。设定保持前一期气候不变, 土地利用/覆盖变化情景下, 模拟了径流过程, 分析了土地利用/覆盖变化对平均流量的可能影响程度, 表明土地利用/覆盖变化对水文影响程度最大的为 23.33%, 最小的为 9.69%, 相对于气候而言, 土地利用变化对流域的水文过程影响程度较低。2000 年以后平均流量呈逐渐的趋势, 但增加幅度较小。

5.2 讨论

月径流量模拟结果精度主要受几个方面的影响: (1) 流域的水库较多, 没有充分考虑所有水库对流量的影响, 并且模型模拟的水库数据误差较大; (2) 流域的用水量对地表径流、浅层地下水与深层地下水的影响很大, 在 SWAT 模型中, 地表水、浅层及深层地下水的用水量参数是按划分的各子流域分别输入, 每个子流域用水量参数难以估计, 并且模型要求输入各子流域不同用水量的月平均值, 只能代表一种平均状况, 导致高于或低于平均值的月份, 模拟的结果会有较大的误差。(3) 受下渗与蒸发等因素的影响, 流域中下游的春季与冬季的月平均地表径流大部分小于 15m³/s, 而有些在 10m³/s 以下, 因此, 受模型误差等各方面的影响, 模型模拟的结果精度一般。因此, 需要充分考虑流域水库对水量的调蓄作用, 并探索估计各子流域用水量的合理方法, 重新模拟水文过程, 提高模拟精度, 分析利用 SWAT 模型模拟地表径

流的有效性。

土地利用变化对水文过程可能影响的模拟结果,只是一种可能的影响结果,因为水文现象错综复杂,尤其人类活动对永定河流域的水文过程影响非常大,仅仅应用简单的数学模型难以完全表达由自然与人类活动共同影响下的复杂流域。但模型模拟结果在一定程度可以反映流域的水文状况。为了让模型模拟的过程接近流域现实状况,对模型中的众多参数进行修正。设定气候不变,模拟土地利用/覆盖变化对水文过程的影响,或设定土地利用不变,模拟气候变化对水文过程影响,这些条件参数如何在模型中表达,以得到一个更合理的结果,是值得深入探讨的问题。

参考文献

- [1] 官攀,陈仲新,唐华俊,张凤荣. 土地覆盖分类系统研究进展. 中国农业资源与区划, 2006, 27 (2): 35~40
- [2] 何英彬,陈佑启. 土地利用/覆盖变化研究综述. 中国农业资源与区划, 2004, 25 (2): 61~65
- [3] Rosenberg N. J., Epstein D. L., Wang D., et al. Possible Impacts of Global Warming on the Hydrology of the Ogallala Aquifer Region. *Journal of Climate*, 1999, 42: 677~692
- [4] Li C. F., Gao J. F., Cao H. Current situation and tendency of research on the impact of land use change on water resources. *Soils*, 2002, (4): 191~205
- [5] Romanowicz A. A., Vanclooster M., Rounsevell M., et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, 2005, (187): 27~39
- [6] Wang S. P., Zhang Z. Q., Sun G., et al. Effects of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau—A case study in the Lüergou watershed, Gansu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28 (1): 48~54
- [7] Li H. P., Yang G. S., Jin Y. Simulation of hydrological response of land use change in Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19 (5): 537~543
- [8] Xie P., Zhu Y., Chen G. C., et al. A lumped watershed hydrological model considering land use and land cover change and its application. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25 (3): 257~264
- [9] Li L. J., Jiang D. J., Li J. Y., et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22 (2): 211~224
- [10] Edwards A. C., Withers P. J. A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK. *Journal of Hydrology*, 2008, 350 (3~4): 144~153
- [11] Yu X. X., Zhang Z. Q., Chen L. H., et al. *Forest Ecological Hydrology*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004
- [12] Wang Z. G., Liu C. M., Wu X. F. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18 (2): 168~173
- [13] Chen J. F., Li X. B., Zhang M. Model simulations of the suomo basin climate and land cover change impacts on watershed hydrology. *Science in China, Ser. D*, 2004, 34 (7): 668~674
- [14] Kannan N., White S. M., Worrall F., et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and run off options for hydrological modeling in SWAT 2000. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 456~466
- [15] Mehmet C. D., Anabela V., Ercan K. Flow forecast by SWAT model and ANn in Pracana Basin, Portuga. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40 (7): 467~473
- [16] Jain S. K., Tyagi. J., Singh V. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model. *Journal of Water Resource and Protection*, 2010, 2: 267~281
- [17] Grayson R. B., Blöschl G., Moore I. D. Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES - C. *Computer models of watershed hydrology*, 1995, 669~696
- [18] Yao H. X., et al. A completely-formed distributed rainfall-runoff model for catchment scale. *IAHS Publications*, 2001, (270): 183~190
- [19] Yang D., Herath S., Oki T., et al. Application of Distributed Hydrological Model in the Asian Monsoon Tropic Region with a Perspective of Coupling with Atmospheric Models. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2001, 79: 1B, 373~385
- [20] Dawdy D. R., Schaake Jr. J. C., Alley W. M. Users Guide for Distributed Routing Rainfall-Runoff Model. *Water Resources Investigations*, 1978: 78~90
- [21] Kouwen N., Soulis E. D., Pietroniro A., et al. Grouped response units for distributed hydrologic modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993, 119 (3): 289~305
- [22] Kite G. W. The SLURP model. Chapter 15 in: *Computer models of watershed hydrology*, V. P. Singh (ed.), Colorado: Water Resources

Publications, 521 ~ 562

- [23] Leavesley G. H. , Stannard L. G. Application of remotely sensed data in a distributed-parameter watershed model. Workshop on Applications of Remote Sensing in Hydrology, 1990; 47 ~ 64
- [24] 叶爱中, 夏军, 王纲胜, 等. 水文水资源模拟系统集成研究——黑河流域系统应用 [J]. 中国农村水利水电, 2004, 8: 76 ~ 79
- [25] Chen L. Q. , Liu C. M. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River. China Environmental Science, 2007, 27 (4): 559 ~ 565
- [26] Manguerra H. B. , Engel B. A. Hydrologic Parameterization of Watersheds for Runoff Prediction Using SWAT. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34 (5): 1149 ~ 1162
- [27] Saleh A. , Arnold J. G. , Gassman P. W. , et al. Application of SWAT for the Upper North Bosque Watershed. Transactions of the ASAE, 2000, 43 (5): 1077 ~ 1087
- [28] 张楠, 秦大庸, 张占庞. SWAT模型土壤粒径转换的探讨. 水利科技与经济, 2007, 13 (3): 168 ~ 172
- [29] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT模型土壤数据库建立方法. 水利水电技术, 2007, 38 (6): 15 ~ 18
- [30] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于SWAT模型的基流估算及评价——以洛河流域为例. 地理科学进展, 2003, 22 (5): 463 ~ 471

SIMULATION OF THE POSSIBLE INFLUENCE OF LAND USE/COVER CHANGE ON THE HYDROLOGICAL PROCESS IN YONGDING RIVER WATERSHED OF CHINA

Hu Hualang¹, Li Weifang^{1*}, Yi Xiangsheng¹, Wang Hong²

(1. Chinese Academy Of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Understanding the influence of spatial arrangement of land use on the spatial change of water resource objectively, and meanwhile revealing the special coupling relation between water and soil can provide an important basis for reasonable use of water and soil resource in the watershed. Based on 1978, 1987, 2000 and 2005 land - use map, soil type maps and climate data from 1970 to 2006, this paper used SWAT model, a distributed hydrological model, to simulate the change of monthly average flow of Yongding River watershed and evaluate the accuracy of the simulation results. Keeping the climate constant, it simulated runoff process and analyzed the influence of land use/cover change on surface runoff process within different land use/cover change scenarios. The results indicated that the model simulation accuracy had reached the requirements of the model application accuracy. In terms of the possible influence degree of land use/cover change on runoff, it was the largest with 23.33% from 1970s to 2000s, while it was the least with 9.69% from 1970s to 1980s. The possibility of climate change on hydrology of the watershed was more than 75%. Overall, the influence degree of land use on watershed hydrological processes was low, the climate was the main factor for the hydrological changes.

Keywords land use/cover change; hydrology; SWAT