

流域土地利用/覆盖与植被变化的水文响应模拟研究^{*}

赖格英^{1,2}, 刘志勇², 刘胤文²

(1. 江西师范大学 鄱阳湖生态环境与资源研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 2. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022)

摘 要:以鄱阳湖的主要水源区梅江流域作为研究区,利用分布式机理性环境水文模型 SWAT,探讨人类活动背景下植被变化对流域水文特征的影响。以遥感获取的叶面积指数(LAI)表征流域的植被状态数据,并通过控制性模拟来研究流域土地利用/覆盖、植被状态的改变导致的流域水文特征响应。模拟结果表明:在 1987 - 2001 年的 15 a 中,虽然流域的土地利用/覆盖变化很小,但由于植被叶面积指数的变化,导致了流域年径流总量 5.4 % 的增加,其中枯水期的增量为 10.2 %,丰水期则为 2.6 %;土地利用/覆盖和植被变化对流域水文过程的影响主要表现在暴雨强度相同的情况下,植被变化对流域流量的影响呈非线性变化趋势,其中对中等程度的暴雨影响最大;植被增加具有明显的使暴雨洪峰出现时间滞后的效应,同时也使洪水之后的“退水”过程变得平缓。

关键词:分布式水文模型;植被变化;水文响应

中图分类号:P333.5;F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)04-0010-05

A Simulation-based Research on the Hydrological Response of Land Use/ Cover and Vegetation Changes in Watershed Scale

LAI Ge-ying^{1,2}, LIU Zhi-yong², LIU Yin-wen²

(1. Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: This paper presented a research on the hydrological responses of watershed-scale land use/ cover and vegetation changes under the background of human activities with Meijiang watershed as study area using physically-based and parameter-distributed hydrological model SWAT. Leaf area index (LAI) got from remote sensing technology was used in this simulation in the format of plant growth database in SWAT to express the watershed vegetation situation. Variable-controlled method was used to simulate the response of watershed hydro-characteristics and hydro-processes to land use/ cover and vegetation changes. The results show that annual runoff in Meijiang watershed increases 5.4 % (which is 10.2 % during dry season, 2.6 % during wet season) because of the changes of vegetation in 15 years (1987 - 2001). On the other hand, the results also show that the impact of vegetation change to water flow in Meijiang watershed has a nonlinear tendency, which means watershed water flow increases with the increasing of LAI of vegetation but the increment of water flow is the largest due to vegetation change in medium rainstorm. The increasing of LAI will obviously result in time delay effect of flood peak and gentle water-flow recession characteristics.

Key words: distributed hydrological model; vegetation change; hydrological response

植被是连接土壤、大气和水分等要素的自然纽带,植被变化与流域水文循环及水文过程构成一个相互作用和相互影响的反馈调节系统,植被的动态变化在某种程度上代表着流域水文下垫面的动态变化,其水文及生态效应是不可忽视的。如森林植被的水文效应就是通过林冠和枯枝落叶层的截留作用以及特殊的森林土壤结构对降水进行了再分配,使森林植被内的降水量、降水强度和降水历时发生明显的变

化,从而影响流域的水文特征和水文过程^[1-2]。联合国“千年生态系统评估”(MA)的实施也客观上提出了进行多尺度、综合评估生态系统各组分之间相互关系的科学问题和科学目标^[3]。因此如何定量评估流域下垫面变化与水文响应之间的关系,是生态环境建设和流域综合管理与评估的重要内容。目前,这方面的研究国内外应用实验室模拟、野外观测实验、模型模拟等不同的方法进行了大量的探索^[2],其中模

^{*} 收稿日期:2007-10-14

基金项目:科技部中德合作项目(2006DFB919205);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2004405311);江西省科技厅国际合作课题(05-01-09);江西师范大学博士启动基金(200600087)

作者简介:赖格英(1963 -),男,教授,博士,主要从事遥感、地理信息系统和流域环境过程模拟的研究。E-mail:laigeying@126.com

型模拟方法主要聚焦于采用分布式具有物理意义的水文或环境水文模型进行的相关模拟研究。由于这些模型以数学物理方法为基础,用离散化的方式描述流域空间尺度上水文要素的空间差异,在空间子单元上表示地形、土壤、植被等下垫面特征以及降水、植被截留、蒸散发、下渗、地表径流和地下径流等水文特征,具有很强的物理意义^[4],同时这种方法具有耗时短及变量可控制等相对优势。因此,利用分布式具有物理意义的水文或环境水文模型进行流域下垫面变化与水文响应之间关系的定量分析和评估得到了许多应用^[2,5-6]。但森林变化的水文效应具有较强的地域特点,不同的水文研究区、不同的水文响应尺度得到的结果差别较大^[7]。

以梅江流域作为研究区,利用分布式机理性环境水文模型 SWAT,探讨在人类活动背景下植被变化对流域水文特征的影响。以遥感获取的叶面积指数(LAI)表征流域的植被状态数据,并设计不同的模拟方案来模拟流域土地利用/覆盖、植被状态的改变导致的流域水文特征响应,旨在从过程与机制上深入认识流域水文特征及过程对植被变化的响应机理,为流域的生态环境建设和流域综合管理与评估等提供理论依据。

1 研究区概况

梅江是鄱阳湖的主要源头之一。梅江流域集水面积 6 983 km²,是中国南方丘陵地区典型的红壤侵蚀区。20 世纪 80 年代区内水土流失严重,后来经过江西省“山江湖工程”大规模的国土整治,生态状况有所好转,流域的地表植被状态也经历了由坏变好的过程^[8]。梅江流域的主要河流为梅江和琴江。贯穿全流域的梅江发源于宁都肖田乡北缘的王陂障,过梅江镇后纳琴江等支流,至于都县龙石咀入贡江,属赣江的上支。流域属于赣南侵蚀中低山与丘陵,中亚热带季风湿润区,气候温和,四季分明,日照充足,雨量充沛。年均气温 18.3℃;平均降水量 1 432 ~ 1 614 mm。4 - 6 月降水最集中,3 个月降水总量各地在 700 ~ 900 mm,占年降水总量的 45 % ~ 50 %。境内水系发达,地表水源十分丰富。流域内山地成土母质主要为变质岩、花岗岩、红色岩及冲积物,主要土壤为酸性红壤和山地红壤。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林。流域在江西省的空间位置见图 1。

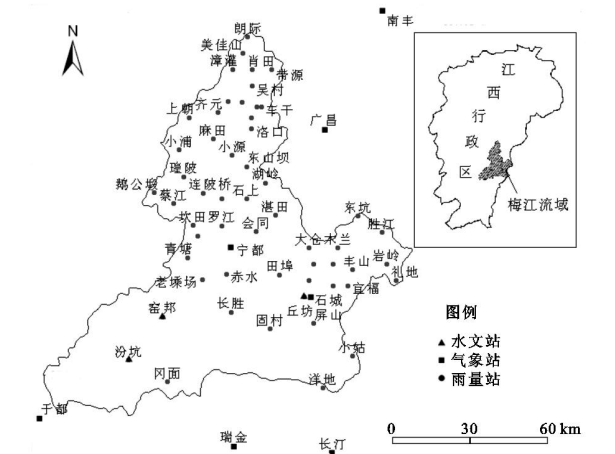


图 1 梅江流域气象、水文及雨量站的空间分布图

2 分布式水文模型及数据处理

2.1 水文模型的选择

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是美国农业部 (USDA) 开发的分布式机理性水文模型。它能够利用地理信息系统和遥感提供的空间信息,模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程,包括水、沙和化学物质的输移与转化过程^[9-10],主要应用在流域的产流、汇流和产沙的模拟以及非点源污染的模拟和模型的输入参数对模拟结果的影响等诸方面的研究上。值得一提的是,SWAT 由于考虑到了流域内土地利用/覆盖、植被生长等因素对流域径流量的影响,因而适合于流域土地利用/覆盖、植被对流域地表径流及相关水文过程影响方面的模拟研究^[11-12]。不同土地利用下的植被信息可以通过遥感获取的植被指数 (NDVI) 经过经验性转换成叶面积指数 (LAI),然后添加到 SWAT 模型中的植物数据库中^[12]。

2.2 数据及其处理

SWAT 模型需要的主要数据包括地形数据、土地利用数据、土壤分布及理化属性、气象和水文等,具体的数据类型和主要参数见表 1。

表 1 SWAT 模型的主要输入数据

数据类型	主要参数
地形	数字高程模型 (DEM)、河网、流域边界
气象数据	降雨、太阳辐射、最高温度、最低温度、相对湿度、风速
土地利用/覆盖	土地利用/覆盖类型分布
植被信息	叶面积指数
土壤分布及其理化属性	饱和水传导率、土壤质地、田间持水量、凋萎系数、容重、pH 值、有机质、全磷、全氮等

其中地形数据来源是国家基础地理信息中心标准的 1 : 25 万地形数据,利用 Arc GIS,经过图幅的合并以及处理加工,形成了数字高程模型 (DEM)、流域边界、水系等专题地图。土壤分布及属性资料采用 1 : 100 万数字化土壤图,其中土壤的理化属性包括沙粒、粉砂、黏粒、有机质、土壤 pH 值、全磷、全氮、速效磷和容重等。降水资料采用梅江流域内 50 个雨量站 1986 年、1987 年的逐日实测资料,气象资料则选择了流域内及周边的 8 个气象站 1986 和 1987 年的逐日实测资料,包括降水、最高与最低气温、风速、相对湿度等气象要素,这些数据用于模型的数据输入;水文数据则采用窑帮、汾坑 2 个水文站的 1986 年、1987 年的逐日径流量,水文数据主要用于模型的参数率定和检验。梅江流域内的各气象站、水文站和雨量站的空间分布如图 1。

土地利用/覆盖资料采样流域内 1987 年和 2001 年 1 : 10 万数字化地图,梅江流域 2001 年的土地利用/覆盖如图 2。

流域内的植被指数 (NDVI) 由 1987 年和 2001 年 9 月 4 个小时相的 NOAA/ AVHRR 数据经辐射校正以后平均计算而得。这里平均计算的意义在于消除遥感数据中的一些随机影响。叶面积指数按照经验公式进行计算^[13] (见图 3 和

图 4), 并根据 SWAT 植物数据库的格式进行存放。

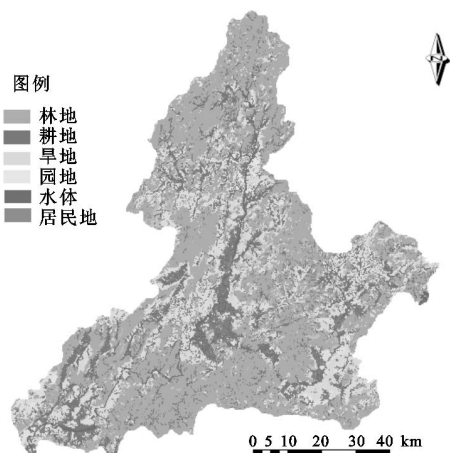


图 2 梅江流域 2001 年土地利用/覆盖图

3 模拟思路及模拟的率定和校验

3.1 模拟思路的设计

利用 1986 年的气象数据、土地利用/覆盖、植被数据, 结合数字高程模型 (DEM) 数据、土壤空间分布和理化属性数据, 对 SWAT 模型进行初步模拟; 模拟过程中, 在窑帮和汾坑 2 个水文站点的位置上, 分别设置 3 个模拟结果的输出点,

用于模拟结果的率定。利用 1986 年窑帮和汾坑 2 个水文站点的实测资料, 对模型的参数进行率定调试, 即将模拟结果与实测水文数据进行对比, 如果对比结果误差较大, 调整模型的相关参数, 直到结果误差在允许的范围内为止, 此时的模型参数即为以后进行实际模拟的参数, 同时也说明模型可用于实际的模拟。

模型经过参数率定和校验以后, 利用该模型和率定好的参数, 对土地利用/覆盖及植被变化的水文响应进行控制性模拟。模拟方案分一般性模拟和控制性模拟, 一般性模拟为模型的数据输入全部采用 1987 年的数据, 包括数字高程模型 (DEM)、土壤类型分布及理化属性、河网分布等静态数据, 以及土地利用/覆盖、植被资料、降水数据和其它气象数据等动态数据, 所得模拟结果作为对照数据; 控制性模拟即为模拟的数据输入除了土地利用/覆盖、植被数据外, 其它的数据仍然采用 1987 年的数据, 而土地利用/覆盖、植被数据即采用 2001 年的。在控制性模拟过程中, 由于除了控制性变量有变化之外, 其余变量都保持不变, 因此有理由认为一般性模拟与控制性模拟的结果差异是由于控制性变量的变化所造成的。在本研究中, 将流域的土地利用/覆盖、植被作为控制性变量, 因此模拟方案主要体现了土地利用/覆盖、植被数据的前后差异, 以模拟土地利用/覆盖、植被变化导致的水文响应。

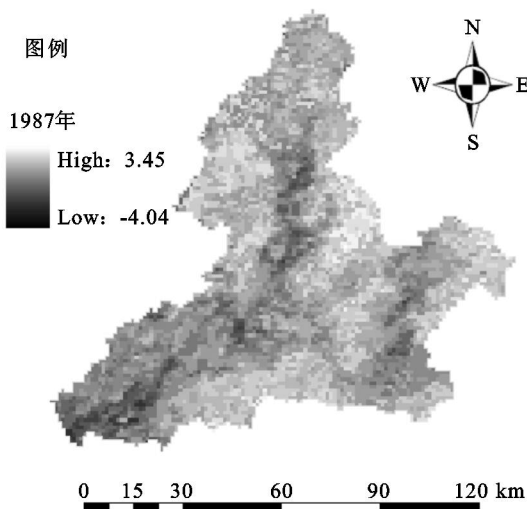


图 3 梅江流域 1987 年遥感叶面积指数分布

3.2 SWAT 模型的模拟率定和校验

SWAT 模型中, 地表径流的敏感参数包括径流曲线系数 (Curve Number, CN2)、土壤饱和含水量 (SOL_AWC) 和蒸发补偿因子 (ESCO) 这 3 个敏感因子。调整模型的参数后进行再次模拟, 1987 年的模拟结果见图 5。

采用相关系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 系数来进行模拟结果的检验。Nash-Sutcliffe 系数反映了模拟值和实测值在量上的统计差异程度。其计算表达式见 (1) 式。ENS 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^[12]。

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (1)$$

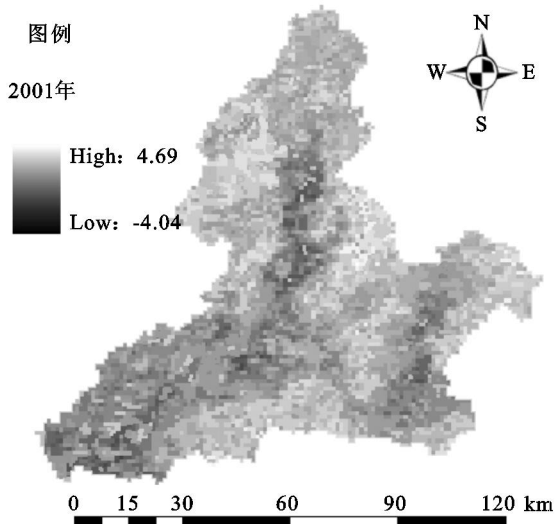


图 4 梅江流域 2001 年遥感叶面积指数分布

式中: Q_m ——实测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——实测值的平均值; n ——计算的样本数量。

最后计算模拟值与实测值之间的 R^2 值和 ENS 值, 汾坑和窑帮 2 个水文站的结果分别为 0.88、0.75 和 0.89、0.72, 这表明, SWAT 模型模拟的结果在模拟的时间段内具有良好的适用性, 可以用于流域径流的相关模拟分析中。

4 植被变化的水文响应模拟

表 2 给出了 1987 年和 2001 年梅江流域的主要土地利用/覆盖类型的面积、叶面积指数及 1987 - 2001 年间的土地利用/覆盖类型的面积、叶面积指数变化数量, 其中叶面积指数是某种土地利用类型的平均叶面积指数。从表 2 可以看出, 15 a 间的梅江流域的林地、园地、草地、居民地和耕地等

土地利用的面积变化不大,其中占地面积最大的林地和耕地的变化量不足 0.16%,林地略有增加,而耕地略有减少。但从叶面积指数角度来看,15 a 间林地和园地的叶面积指数有很大的增加,其中林地 LAI 增加了 50.1%,园地增加了 51.4%。

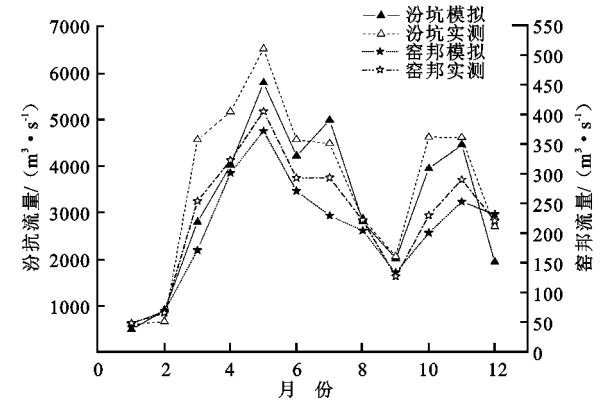


图 5 模型校准后 1986 年的月流量模拟结果

表 2 梅江流域土地利用/ 覆盖、叶面积指数的变化

年份	土地利用类型/ km ²					叶面积指数			
	林地	园地	草地	居民地	耕地	林地	园地	草地	耕地
1987	4791.5	601.0	96.0	69.1	1425.5	2.87	2.76	3.11	3.23
2001	4800.7	592.5	95.9	70.5	1423.6	4.32	4.18	3.07	3.31
差值	9.2	- 8.5	- 0.1	1.4	- 1.9	1.45	1.42	- 0.04	0.08

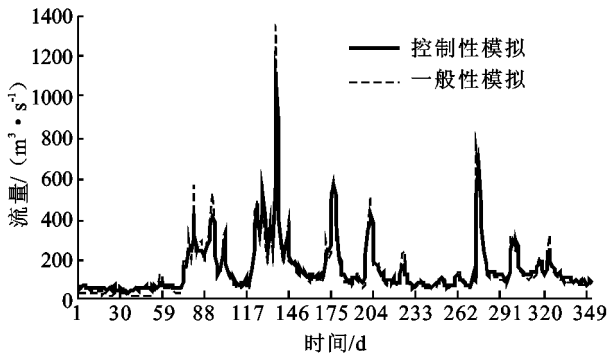


图 6 一般性模拟和控制性模拟的流量

从以上结果看,梅江流域 1987 - 2001 年的土地利用/ 覆盖变化尽管不大,但由于植被的茂密程度有了较大的变化,这种变化的水文响应所带来的径流量增加却很明显,尤其对枯水期的径流量变化效应更加明显。据江西省水土保持委员会办公室的研究表明^[8],2000 年梅江河流域(在宁都县境内,为梅江流域的上游)平均降雨量为 1 520.7 mm,径流总量为 17.90 亿 m³,枯水期径流总量为 3.61 亿 m³,而 1987 年的降雨量以 2000 年相比非常接近,为 1 548.1 mm,但 1987

叶面积指数是单位土地面积上植物的总叶面积,因此在某种程度上,它可以反映在一定的空间范围内植被的覆盖度。叶面积指数的增加意味着植被茂密程度的增加。

按照上述设计的模拟方案,进行一般性模拟和控制性模拟,以一般性模拟结果作为对照,所得结果用于分析流域流量和汇流过程对土地利用/ 覆盖、植被变化的响应。

4.1 流域径流总量的变化分析

图 6 和表 3 分别表示了一般性模拟和控制性模拟的结果,从图中可以看出,一般性模拟和控制性模拟有很好的吻合性。控制性模拟的流量产出比一般性模拟的流量产出要大,并且枯水期(10 月至次年的 3 月)的流量比丰水期(4 - 9 月)的流量大。表 2 的数据表明,除了 3 月的控制性模拟结果比一般性模拟结果小外,其余月份的径流总量都比一般性模拟的结果大,其中控制性模拟的年径流总量比一般性模拟的年径流总量增加了 5.4%;而枯水期增加了 10.2%,丰水期则为 2.6%。

年的径流总量只为 14.9 亿 m³,枯水期径流总量为 3.32 亿 m³,因此从这可以看出,模拟的结果与实际情况非常接近。

4.2 汇流过程变化的分析

根据控制性模拟和一般性模拟的结果,对 1987 年的主要暴雨过程进行分析,1987 年流域内共有 5 次主要暴雨过程。图 7 是绘制的控制性模拟和一般性模拟的汇流过程曲线,其中(a)是中等强度降雨的汇流过程曲线,(b)是高强度暴雨的汇流过程曲线。分析这 5 次主要暴雨过程,对照图 7 的(a)和(b),可以发现具有以下几点明显特征:(1)无论暴雨强度大还是强度小,控制性模拟的流量总是比一般性模拟小;(2)控制性模拟与一般性模拟的流量差值随暴雨强度的增大而减小;(3)中等强度的暴雨洪峰出现时间,控制性模拟比一般性模拟有滞后的现象;(4)控制性模拟的“退水”过程比一般性模拟的“退水过程”要平缓。根据模拟过程中所设置的控制性变量为土地利用/ 覆盖、植被信息这个事实,有理由认为,以上的几点特征是由于流域的汇流过程对土地利用/ 覆盖、植被变化的响应造成的,流域土地利用/ 覆盖、植被的变化改变了流域的水文下垫面参数,使流域降水的下渗、植被截留、蒸散发、蓄满产流、坡面汇流等过程都有了根本性的改变。

表 3 控制性模拟与一般性模拟的流域径流总量对比

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总量
控制性模拟	1.052	1.019	3.746	4.518	9.255	4.009	4.983	2.521	1.852	4.225	4.064	2.726	43.970
一般性模拟	0.503	0.558	3.936	4.455	9.082	3.937	4.729	2.467	1.767	3.983	3.976	2.322	41.715
差 值	0.550	0.461	- 0.190	0.064	0.172	0.072	0.253	0.054	0.085	0.242	0.088	0.404	2.256
增量比例/ %	109.3	82.6	- 4.8	1.4	1.9	1.8	5.4	2.2	4.8	6.1	2.2	17.4	5.4

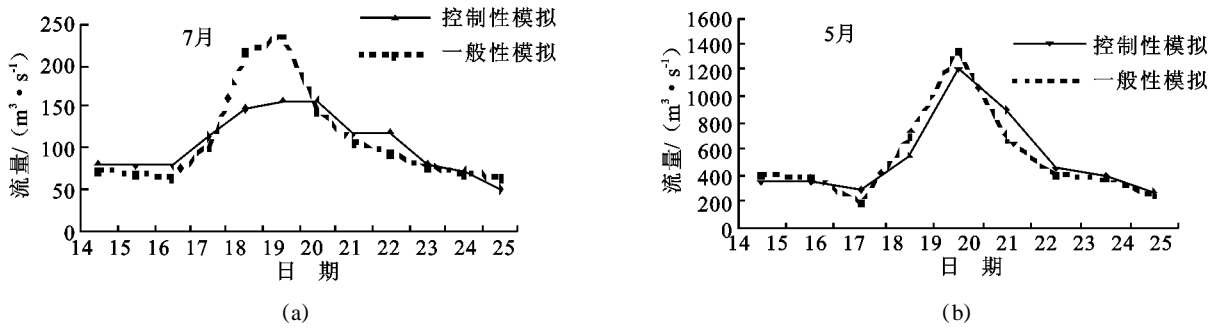


图 7 控制性模拟和一般性模拟的汇流过程

5 结论与讨论

利用 SWAT 模型,综合考虑了地形、土壤、气象、土地利用/覆盖和植被变化等因素,在实测资料的基础上,经过模型调试和参数率定以后,将流域土地利用/覆盖和植被变化信息作为模拟的控制性变量,对流域土地利用/覆盖和植被变化的流域水文及流域水文过程响应进行控制性模拟。结果表明:

(1) 在 1987 - 2001 年 15 a 中,虽然流域的土地利用/覆盖变化很小,但植被的叶面积指数却变化很大,其中流域内主要的土地利用/覆盖类型——林地和园地,其叶面积指数分别增加了 50.1% 和 51.4%。通过模拟表明,其效应表现为流域年径流总量增加了 5.4%,其中枯水期的增量为 10.2%,丰水期则为 2.6%。

(2) 模拟结果还表明:土地利用/覆盖和植被变化对流域水文过程的影响主要表现在暴雨强度相同的情况下,植被的变化对流域流量的影响呈非线性变化趋势,其中对中等程度的暴雨影响最大;另外,植被增加具有明显的使暴雨洪峰出现时间滞后的效应,同时也使洪水之后的“退水”过程变得平缓。

(3) SWAT 模型由于有植物生长的模拟组件,通过预先设置各种植被类型的叶面积指数,并于数据库的方式进行存储,就可进行流域过程的模拟。从本文的模拟结果来看,SWAT 模型不仅可以用于水文、土壤、非点源污染等重要地表过程的模拟,还可以有效地应用其包含的植物生长组件,通过遥感获取地表植物生长信息,进行快速模拟和评估流域的生态系统,为流域综合管理提供必要的决策支持。

参考文献:

[1] 王清华,王怀恩,卢科锋,等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(2): 21-24.

[2] 张志强,王盛萍,孙阁,等. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展[J]. 生态学报,2006,26(7): 2356-2364.

[3] 赵士洞,张永民. 生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望[J]. 地球科学进展,2006,21(9): 895-902.

[4] 赖格英,于革. 流域尺度的营养物质输移模型研究综述[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5): 574-577.

[5] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆盖变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报,2007,22(2): 211-223.

[6] 王德连,雷瑞德,韩创举. 国内外森林水文研究现状和进展[J]. 西北林学院学报,2004,19(2): 156-160.

[7] 魏晓华,李文华,周国逸,等. 森林与径流关系:一致性和复杂性[J]. 自然资源学报,2005,20(5): 761-770.

[8] 江西省水土保持委员会办公室. 试析宁都县水土保持生态建设对梅江河水环境的影响[J]. 江西省水保信息,2006(20): 23-27.

[9] 王中根,刘昌明,黄友波. Swat 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1): 79-86.

[10] 张银辉. Swat 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展,2005,24(5): 121-129.

[11] Yu Ge, Xue Bin, Lai Geying, et al. A 200-Year historical modeling of catchment nutrient changes in Taihu-basin China [J]. Hydrobiologia, 2007, 581: 79-87.

[12] Lai Geying, Ge Yu. Preliminary study on assessment of nutrient transport in the Taihu Basin based on SWAT modeling [J]. Science in China series D: Earth Sciences, 2006, 49(21): 135-145.

[13] 李开丽,蒋建军,茅荣正,等. 植被叶面积指数遥感监测模型[J]. 生态学报,2005,25(6): 1491-1496.