

水土保持措施的水文效应模拟研究

陈卫宾¹, 毋红军², 董增川³

(1. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

[关键词] TOPMODEL 模型; 植被地形指数; 水土保持措施; 水文效应

[摘要] 将 TOPMODEL 模型进行改进, 在地形指数中引入了植被覆盖的影响, 提出了植被地形指数的概念, 通过流域网格划分实现了水土保持措施的水文效应模拟。以江西修河流域清江站以上水土流失较为严重的地区为研究区, 根据 1992—1996 年的逐日流量资料, 进行了梯田、经果林、人工草地及水保林 4 种水土保持措施的水文效应模拟。结论认为: 基于改进的 TOPMODEL 模型模拟水土保持措施的水文效应是可行的, 模拟结果可信。

[中图分类号] S157 [文献标识码] A [文章编号] 1000 - 0941 (2009) 06 - 0030 - 03

研究地表及其覆被变化条件下的水文水资源响应过程是现代水文学的重要方向, 也是 MAB (人与生物圈计划) 和 HP (国际水文计划) 等研究计划的主要内容之一^[1]。水土保持措施通过改变微地形、地表覆被和土壤特性等边界条件, 影响降水的分配、蒸散发和径流的产生机制, 从而影响了流域的水文水资源过程。水土保持的水文水资源效应研究大都采用试验流域的方法^[2], 包括控制流域法、单独流域法、平行流域法和多数并列流域法等。试验流域方法直观, 研究结果易于接受, 但也有局限性, 主要是试验范围小, 通常在小流域进行; 研究周期长; 可对比性差, 难以找到 2 个地理和气象等条件完全相同的流域, 即使是同一个流域, 其前后的各种条件也不尽相同; 各项指标测量方法的可靠性以及测量的精度难以控制。为了克服这些不足, 越来越多的研究者采用室内模拟实验、数学模型模拟与试验流域相结合的方法。就模型手段而言, 自 20 世纪 60 年代以来随着计算机技术的发展, 研究流域水文过程的数学模型有了长足的进步^[3], 例如基于 GIS 技术的具有物理基础的分布式模型、基于水文响应单元的经验性模型以及半分布式的数字地形指数模型等^[4]。但是, 利用流域水文模型模拟土地覆被变化影响的研究目前仍处于起步阶段, 尤其是应用 RS 和 GIS 技术建立分布式水文模型模拟气候与 LUCC 水文效应的研究工作仍显薄弱。

本文拟利用改进的 TOPMODEL 模型, 将水土流失比较严重的江西修河流域清江站以上区域作为研究区域进行水土保持措施的水文响应过程模拟研究, 为评价流域水土流失治理的水文水资源效应提供了一种有效的分析途径。

1 研究方法

1.1 TOPMODEL 模型的改进

TOPMODEL 模型是由 Beven 和 Kirbby 在 1979 年提出的, 它以变源产流为基础, 基于 DEM 推求地形指数, 再利用地形指数反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响。该模型具有结构概念简单、优选参数少、参数具有物理意义的优点,

可以模拟区域内任意一点的地下水位埋深 (z_i)。但是 TOPMODEL 模型认为整个流域上的饱和导水率都是相同的, 忽略了植被覆盖和水土保持措施对径流的影响, 也没有考虑降水、蒸发等因素的空间分布对流域产汇流的影响, 不能直接用于模拟流域水土流失治理产生的水文水资源效应的变化过程。因此, 根据水土流失治理的特点对 TOPMODEL 模型进行如下改进: 设流域内水土保持措施类型可分为 m 种, 且每个网格内的水土保持措施类型是一致的; 同一水土保持措施类型的地块, 其土壤饱和导水率 T_0 相同; 流域全部为裸地时流域的平均饱和水力传导度为 T_0 。其计算公式可以表示为:

$$z_i = z - S_m \cdot [\ln \left(\frac{a_i \cdot R}{i \cdot \tan i} \right) - \frac{1}{A} \int \ln \left(\frac{a_i}{i \cdot \tan i} \right) dA_i] \quad (1)$$

式中: i 为水文单元编号; z_i 为水文单元 i 的地下水位埋深; z 为流域平均地下水位埋深; R 为流域产流速率, 假定在全流域均匀分布; a_i 为单元 i 的单宽集水面积; S_m 为非饱和区最大蓄水深度; $\tan i$ 为单元 i 的地表局部坡度; A 为模拟区域总面积; A_i 为单元 i 的面积; $i = T_{0i} / T_0$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), n 为水文单元总数。

可以看出, 水文单元 i 的地下水位埋深 z_i 由该处的 $\ln \frac{a_i}{i \cdot \tan i}$ 控制, 我们称之为植被地形指数, 在流域内植被地形指数相同的点具有水文相似性。在兰开斯特大学环境与生物科学研究所开发的 GR DA TB 的基础上, 将下垫面资料以及各种植被覆盖的参数, 输入系统, 计算出各水文单元的植被地形指数, 作为改进 TOPMODEL 模型的输入资料。

1.2 降雨插值与蒸发

为了反映降雨的空间不均匀性, 利用反距离平方法进行降雨空间插值, 可以得到第 i 个网格的降雨量 P_i 。冠层蒸发量 (E_c) 由下式计算:

$$\begin{cases} E_c = IC & (IC < E_0) \\ E_c = E_0 & (IC \geq E_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_0 为潜在蒸发量; IC 为冠层蓄水量。

地面蒸发按实测资料计算,潜在蒸发应根据当地气象资料由 Penmon-Monteith公式计算。

1.3 产流、汇流计算

研究区属于南方红壤水土流失区,根据其水土保持的水文效应,主要考虑蓄满产流。流域的总产流量 Q 等于饱和坡面流 Q_f 与壤中流 Q_b 之和,即

$$Q = Q_f + Q_b \quad (3)$$

$$Q_b = AT_0 \exp(-z/S_m) \exp(-\dots) \quad (4)$$

$$Q_f = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \max\{[S_{uz,i} - \max(z_i, 0)], 0\} A_i \quad (5)$$

式中: $\dots = \frac{1}{A} \int_{A_i} \ln\left(\frac{a_i}{i \cdot \tan i}\right) dA_i$; Δ 为计算步长; $S_{uz,i}$ 为不饱和和层土壤蓄水量;其余符号意义同上。

采用熊立华等^[5]提出的坡面汇流公式进行汇流计算,将每个网格的产流汇到子流域出口处进行叠加,得到子流域出口断面的流量过程,然后利用 DEM 提取的河网信息,将各个子流域出口断面的流量过程进行“演算—汇合—演算”,最终得到整个流域出口断面的流量过程。图 1 显示了改进 TOPMODEL 模型的计算流程,其中 Muskingum“演—合—演”河网演算指的是将各个子流域出口断面的流量过程作为河网各个节点的输入信息,采用演算法演算到结点处,在结点处将各个支流的流量汇合后再采用演算法演算到下一结点处,直至流域出口。

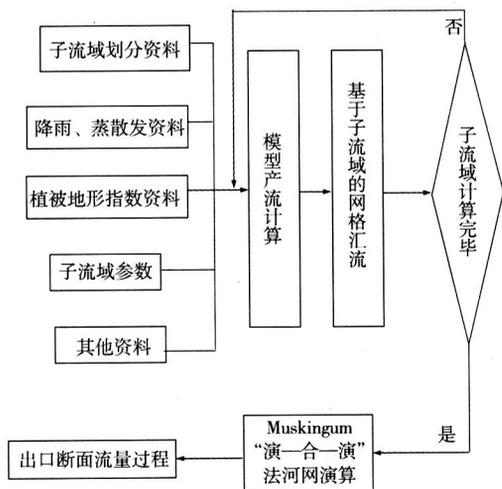


图 1 改进 TOPMODEL 模型的计算流程

1.4 参数率定

除植被地形指数以外,本文所用到的模型参数主要有 7 个: S_m 为非饱和区最大蓄水深度, m; T_0 为裸地刚达到饱和时的传导度, m^2/h ; Td 为重力排水的时间滞时参数; SR_{max} 为田间持水量的通量, m; SR_0 为根带土壤饱和和缺水量的初值, m, 与 SR_{max} 成比例; RV 为地表坡面汇流的有效速度, m/h; CHV 为主河道汇流的有效速度, m/h; 另外, 汇流时还要用到马斯京根参数 (K_c) 以及距离和面积参数等。本文模型的参数率定采用罗森布朗克 (Rosenbrock) 法。然后根据 4 个准则进行模型应用效果评判, 即洪峰流量相对误差 RQ 、径流深相对误差 RR 、峰现时差 T 以及 Nash 和 Sutcliffe (1970) 提出的 Nash 效率系数 (确定性系数) R^2 。 R^2 的计算表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [Q_{cal}(j) - Q_{obs}(j)]^2}{\sum_{j=1}^m [Q_{obs}(j) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (6)$$

式中: j 为模拟时段的序数; m 为模拟时段的总数量; $Q_{cal}(j)$ 为第 j 个模拟流量; $Q_{obs}(j)$ 为第 j 个实测流量; \bar{Q}_{obs} 为实测流量平均值。

2 模型应用

2.1 基于 GIS 的水土保持措施最大可规划面积

本次研究将下垫面植被覆盖分为:郁闭度大于 30% 的林地、灌木林地、稀疏林地、高度覆盖草地、中度覆盖草地、低度覆盖草地、坡耕(旱)地、裸地、水田、城镇居民用地、农村居民用地、工矿和道路建设用地 12 种土地利用类型,和梯田、经果林、人工草地及水保林 4 种水土保持措施共计 16 种下垫面类型。根据江西省水保生态科技园的试验成果,得到不同土地利用类型的饱和水力传导度比值及土壤孔隙率比值,见表 1 和表 2。将研究区域划分为 9 个子流域(图 2),利用美国国家图像测绘局 (NMA) 提供的 DEM 数据在 ArcGIS9.0 中进行坡度分析生成子流域网格坡度,然后利用江西省第三次(2000 年)遥感资料提取子流域各网格的土壤侵蚀及植被覆盖数据。利用改进的 TOPMODEL 模型模拟水土保持水文效应,首先要每个网格上进行水土保持措施规划。根据水土保持规划原则,得到 9 个子流域及整个研究区域的不同水土保持措施的最大可规划面积,见表 3。

表 1 不同土地利用类型的饱和水力传导度比值

土地利用类型	裸地	旱地	梯田	水田	经果林地	种草	高度覆盖草地
饱和和传导度	T_0	$1.5T_0$	$3T_0$	$0.8T_0$	$3.5T_0$	$4T_0$	$2T_0$
土地利用类型	中度覆盖草地	低度覆盖草地	郁闭度大于 30% 的林地	灌木林地	稀疏林地	水保林	
饱和和传导度	$1.3T_0$	$1.1T_0$	$4.5T_0$	$4T_0$	$1.4T_0$	$5.2T_0$	
土地利用类型	农村居民用地	工矿和道路建设用地	城镇居民用地				
饱和和传导度	T_0	$0.5T_0$	$0.2T_0$				

表 2 不同土地利用类型的土壤孔隙率比值

土地利用类型	裸地	旱地	梯田	水田	经果林地	种草	高盖度草地
土壤孔隙率		1.04	1.15	0.95	1.14	1.15	1.14
土地利用类型	中盖度草地	低盖度草地	郁闭度大于 30% 的林地	灌木林地	稀疏林地	水保林	
土壤孔隙率	1.1	1.07	1.2	1.15	1.14	1.21	
土地利用类型	农村居民用地	工矿和道路建设用地	城镇居民用地				
土壤孔隙率	0.8	0.5	0.1				

2.2 模拟成果

根据研究区域 1992—1996 年的降雨及清江站实测径流资料进行日模拟模型参数率定,得到了参数率定结果(表 4)。依据表 4 给出的日模拟模型参数,模拟了研究区原状条件下(未开展水土保持措施)的各特征值(表 5),其中确定性系数基本达到了 0.8 以上,说明了模拟结果具有准确性。然后,将 4 种水

水土保持措施(梯田、经果林、人工草地及水保林)按照上述各子流域不同措施最大可规划面积分别布置到研究区域内,将布置水土保持措施后的下垫面资料输入到改进后的 TOFMODEL 模型中,分别进行径流模拟。将模拟结果与原状条件下的径流模拟过程进行对比,得到了各种水土保持措施对研究区径流过程的影响效果(表 6)。



图 2 研究区子流域划分及河网图

表 3 各子流域不同措施最大可规划面积 km²

子流域编号	人工草地	水保林	经果林	梯田
1	288.2	288.2	288.2	280.0
2	36.8	36.8	36.8	35.4
3	99.3	99.3	99.3	94.5
4	226.4	226.4	226.4	216.7
5	261.4	261.4	261.4	245.5
6	131.0	131.0	131.0	123.4
7	137.9	137.9	137.9	136.1
8	108.2	108.2	108.2	99.3
9	248.2	248.2	248.2	231.1
合计	1 537.4	1 537.4	1 537.4	1 462.0

表 4 研究区日模拟模型参数率定结果

子流域编号	S_{sm}	T_0	T_d	SR_{max}	CHV	RV
1	0.02	5	1.5	0.01	6 000	9 000
2	0.02	5	1.5	0.01	6 000	8 000
3	0.02	5	1.5	0.01	6 000	8 000
4	0.02	5	1.5	0.01	6 000	9 000
5	0.02	5	1.5	0.01	6 000	8 000
6	0.02	5	1.5	0.01	6 000	6 000
7	0.02	5	1.5	0.01	6 000	6 000
8	0.02	5	1.5	0.01	6 000	7 000
9	0.02	5	1.5	0.01	6 000	6 000

表 5 研究区原状条件下的日模拟结果特征值

年份	实测径流深 (mm)	预报径流深 (mm)	径流深相对误差 (%)	实测最大洪峰流量 (m ³ /s)	预报洪峰流量 (m ³ /s)	洪峰流量相对误差 (%)	确定性系数 R ²
1992	819.2	873.2	6.6	1 530	1 553.7	1.5	0.83
1993	1 257.8	1 393.2	10.8	4 970	5 504.0	10.7	0.80
1994	763.3	828.0	8.5	2 990	4 181.8	39.9	0.64
1995	712.1	829.9	16.5	1 780	1 357.5	-23.7	0.87
1996	765.7	857.1	11.9	1 090	1 511.5	38.7	0.84

3 结 论

本文将 TOFMODEL 模型进行改进,在地形指数中引入了植被覆盖的影响,提出了植被地形指数的概念;在产汇流模拟中对流域进行网格划分,以网格为水文单元,使该模型能够模拟下垫面变化对产汇流的影响,为实现水土保持措施的水文效应模拟研究奠定了基础。以修河流域清江站以上水土流失较为严重的地区为研究区,通过日模拟参数率定,计算得到原状条件下的日模拟结果特征值。最后,通过采用 4 种水土保持措施(梯田、经果林、人工草地及水保林),将模拟结果与原状条件下的径流模拟过程进行对比,得到了各种水土保持措施对研究区径流过程的影响效果。上述步骤都取得了较理想的成果,充分说明基于改进的 TOFMODEL 模型的水土保持措施的水文效应模拟是可行的,模拟结果可信。

表 6 4 种水保措施对研究区平均径流影响效果模拟结果(增量百分比)

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	全年
人工草地	-4.25	-15.34	-8.15	-1.41	-2.61	-1.66	-4.89	-8.57	-8.26	-9.68	-7.95	-4.95	-3.7
水保林	-4.26	-15.51	-8.16	-1.44	-2.21	-1.71	-4.93	-8.62	-8.31	-9.94	-7.95	-4.94	-3.7
经果林	-4.25	-14.83	-6.91	-0.24	-1.24	-0.83	-4.28	-7.84	-7.17	-9.17	-7.22	-4.32	-2.8
梯田	-4.29	-15.80	-8.60	-1.64	-2.64	-2.04	-5.13	-9.06	-8.38	-10.12	-8.07	-4.90	-3.9

[参考文献]

[1] Janauer G A. Eco-hydrology: fusing concepts and scales[J]. Ecology Engineering, 2000, 16(1): 9 - 16

[2] 中野秀章. 森林水文学[M]. 李云森,译. 北京:中国林业出版社,1983: 35 - 38

[3] Beven K J. Rainfall-runoff modeling: the primer[M]. Chichester: John Wiley & Sons, LTD, 2001.

[4] Wignosta M S, Vail L W, Lettermaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1 665 - 1 679.

[5] 熊立华,彭定志. 基于数字高程模型的等流时线推求与应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2003, 36(3): 1 - 3.

[作者简介] 陈卫宾(1976 -),男,河南开封市人,工程师,博士,主要研究方向为水资源高效利用及管理。

[收稿日期] 2008 - 12 - 15

(责任编辑 李杨杨)