

GTOPMODEL 模型与 TOPMODEL 模型比较

张 珂 李致家 包红军

(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)

摘要 构造了名为 GTOPMODEL 用于洪水模拟基于栅格的分布式水文模型 .通过假设土壤饱和水力传导率随着深度的增加呈指数递减和地下水面平行于地表面 ,推导出了基本方程 ,介绍了植物及根系截留、蒸散发、地下水补给、基流以及汇流的计算方法 ,并与 TOPMODEL 进行了比较 .采用因特网提供的数字高程模型、土壤组成和土地覆盖等资料 ,选用流域面积 4 716 km² 的黄河支流-洛河卢氏以上流域 ,应用两个模型进行了洪水模拟比较 .结果表明 ,在该流域 GTOPMODEL 比 TOPMODEL 模拟更好 .

关键词 GTOPMODEL 模型 ;数字高程模型 ;黄河流域 ;TOPMODEL 模型 ;分布式水文模型

中图分类号 :P338 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)05-0509-04

TOPMODEL 是 Beven 等^[1] 1979 年提出的一种半分布式水文模型 .该模型采用体现地形空间变化的地形指数来反映径流运动的分布规律 ,根据重力排水、径流沿坡向运动的原理进行产流计算 ,采用类似等流时线法进行汇流计算 ,在国内得到了较广泛的应用与研究^[2~5] .笔者借鉴其部分产流概念 ,构建了一种基于 DEM 栅格和地形的分布式水文模型——GTOPMODEL(Grid-and-TOPgraphy-Based Hydrological MODEL) .

1 GTOPMODEL 的构建

GTOPMODEL 根据单流向法从 DEM 提取排水网络 ,建立栅格间的拓扑关系 ,并将流域划分成单元汇流带 ,在此基础上进行逐栅格产流计算 ,再采用 Muskingum 水流演算法将水流逐栅格演算至出口 ,得到出流过程 .单元汇流带定义为汇向同一整段河道的栅格组成的汇流区域 .如图 1 所示 ,将流域划分成栅格 (由 DEM 提取的流域本来就是由栅格组成) 图中流域有 4 段河道 ,因此可以划分成 4 个单元汇流带 .

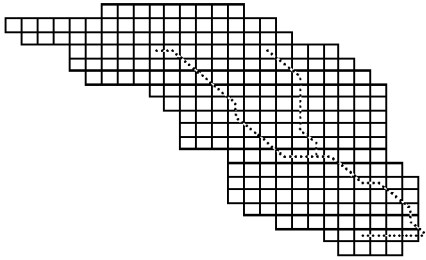


图 1 单元汇流带示意图

Fig.1 Sketch of unit confluence areas

1.1 基本假设与方程

GTOPMODEL 采用了 TOPMODEL 3 条假设中的 2 个 :土壤饱和水力传导率随着深度的增加呈指数递减的关系 ,地下水面平行于地表面^[6] ,推导出了基本方程式 (1) .该式反映了单元汇流带平均土壤含水量与单个栅格土壤含水量之间的关系 .

$$\frac{\bar{D} - D_i}{m} = \left(\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - \lambda \right) - (\ln T_{0_i} - \ln T_e) \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} \quad \ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln T_{0_i} \quad T_{0_i} = \frac{K_{0_i}}{f}$$

式中 : f ——消减系数 ,认为在单元汇流带内取值相同 ,可通过公式 $f=(\theta_s - \theta_r)/m$ 替换 ,其中 θ_s 是饱和含水率 , θ_r 是凋萎含水率 ; K_{0_i} ——单元栅格 i 的土壤表层饱和水力传导率 ; A ——单元汇流带面积 ; A_i ——单元栅格 i 的面积 ; a_i ——单元栅格 i 的集水面积 ; $\bar{D}$ ——单元汇流带平均土壤含水量 ; D_i ——单元栅格 i 的土壤含水量 .将 T_{0_i} 作为参数 ,则

$$T_{0_i} = P_{沙} T_{0沙_i} + P_{黏} T_{0黏_i} + P_{壤} T_{0壤_i}$$

收稿日期 2005-01-18
基金项目 国家自然科学基金资助项目(50279006) ;国家自然科学基金资助项目(50479017)
作者简介 张珂(1979—) ,男(土家族) ,湖北利川人 ,硕士研究生 ,主要从事水文模拟及洪水预报研究 .

式中, $P_{沙_i}$, $P_{黏_i}$ 和 $P_{壤_i}$ 分别指单元栅格 i 的土壤中沙土、黏土和壤土的组成质量分数.

1.2 产流计算

GTOPMODEL 的产汇流计算都以栅格为基础. 栅格在垂向分 3 层: 植被及根系截留层、土壤非饱和层和土壤饱和层(图 2).

a. 植被及根系截留. GTOPMODEL 利用卫星遥感图像得到栅格的土地覆盖类型, 假设在具有相同土地覆盖类型的栅格上, 参数 SR_{max} (植被及根系最大截留量) 取值相等. 而 TOPMODEL 中 SR_{max} 在单元流域相同值. 进入土壤的净雨 $P_{0_i}(t)$ 由式(2) 计算:

$$P_{0_i}(t) = \max\{0(P_i(t) - S_{rz_i}(t))\} \tag{2}$$

式中, $S_{rz_i}(t)$ 为单元栅格 i 上 t 时段的植被及根系截留层缺水

量. b. 蒸散发计算. 在 GTOPMODEL 中, 蒸散发计算分两层: 植被及根系截留层和土壤非饱和层. 蒸散发先发生在植被及根系截留层, 当该层水分蒸发完后, 土壤非饱和层将会有蒸散发损失. 计算公式为

$$E_{a_i}(t) = E_{p_i}(t) \left\{ 1 - \left(\frac{S_{rz_i}(t)}{SR_{max_i}} \right)^\alpha \right\} \tag{3}$$

$$E_{b_i}(t) = E_{p_i}(t) \left\{ 1 - \left[\frac{S_{uz_i}(t)}{S_{uz_i}(t) + D_i(t)} \right]^\beta \right\} \tag{4}$$

式中: $E_{p_i}(t)$ ——单元栅格 i 上 t 时段的实测器皿蒸发量; α, β ——参数; $S_{uz_i}(t)$ ——单元栅格 i 上 t 时段的土壤非饱和层蓄水量; $D_i(t)$ ——单元栅格 i 上 t 时段的土壤缺水

量. d. 土壤非饱和层重力排水, 即地下水补给. 通过计算单元汇流带内每个栅格的地下水补给和地下水出流量就可以计算出单元汇流带的平均土壤缺水

$$q_{v_i}(t) = \frac{S_{uz_i}(t)}{D_i(t)t_d} \tag{5}$$

式中, t_d 是时间参数.

e. 土壤饱和层出流, 即基流. GTOPMODEL 采用公式(6) 计算每个栅格的基流 $q_b(t)$, 而 TOPMODEL 采用公式(7) 计算单元流域总基流 $Q_b(t)$.

$$q_b(t) = T_{0_i} e^{-\bar{K}(t) \gamma^m} e^{-\lambda} \tag{6}$$

$$Q_b(t) = AT_0 e^{-\bar{K}(t) \gamma^m} e^{-\lambda} \tag{7}$$

式中: $q_b(t)$ ——单元栅格 i 在 t 时段的基流; A ——计算单元流域面积.

f. 饱和和坡面流. 当 $D_i(t) < 0$ 时, 土壤达到饱和, 地表将产生饱和和坡面流 $|D_i(t)|$.

1.3 汇流演算

GTOPMODEL 根据 D8 法^[7] 计算出每个栅格的出流方向, 生成排水网络并建立栅格演算次序矩阵. 利用 Muskingum 法逐栅格演算至流域出口. 图 3 所示区域由 6 个栅格组成, a, b, c 水流都流入 d , 出流量分别为 Q_a, Q_b 和 Q_c . 根据 Muskingum 法式(8), 可以计算出 a, b, c 到 d 的流量 Q'_a, Q'_b 和 Q'_c . 则 d 的出流量 Q_d 为 Q'_a, Q'_b, Q'_c 与 d 栅格自身产流量 Q_{d_0} 之和(式(9)).

$$Q_{j+1}^n = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n \tag{8}$$

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - xk}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_2 = \frac{0.5\Delta t + xk}{(1-x)k + 0.5\Delta t} \quad C_3 = \frac{(1-x)k - 0.5\Delta t}{(1-x)k + 0.5\Delta t}$$
$$Q_d(t) = Q'_a(t) + Q'_b(t) + Q'_c(t) + Q_{d_0}(t) \tag{9}$$

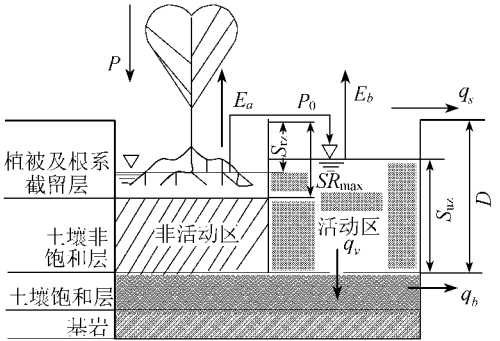


图 2 DEM 栅格垂向分层及水分运动概化图
Fig.2 Stratification of DEM grids and profile of water movement

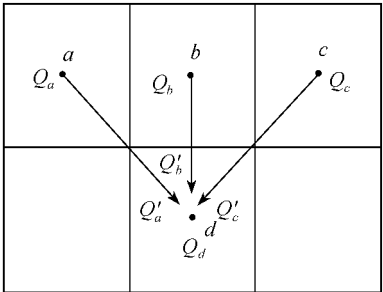


图 3 基于网格的 Muskingum 洪水演算法简图

Fig.3 Sketch of grid-based Muskingum flood routing method

2 应用比较

2.1 流域概况

选择黄河支流洛河卢氏以上流域为研究流域. 卢氏水文站控制面积 4 716 km², 干流长 140 km. 流域西高东低, 高程为 356 ~ 2747 m, 属暖温带山地季风气候, 年降水量为 500 ~ 1 100 mm, 并随地形高度增加而递增. 采用美国地质调查局(USGS)提供的 30" × 30"DEM 数据提取卢氏站以上流域并划分单元汇流带. 图 4 为该流域土壤覆盖类型分布图(分辨率 30", 来自 USGS), 图 5 为土壤成分分布图(分辨率 1°, 来自 NOAA 卫星). 采用石门峪等 27 个雨量站的雨量资料以及卢氏水文站 1989, 1992 和 2003 年的 3 次洪水(次洪, 时段长为 1 h), 对两个模型进行应用比较. 表 1 和表 2 分别为 GTOPMODEL 和 TOPMODEL 的参数值, 表 3 为两个模型模拟结果的对比.

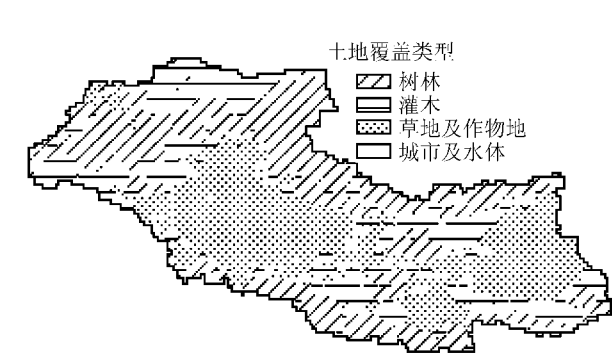


图 4 洛河卢氏以上流域的土壤覆盖类型分布

Fig.4 Landcover map of the upper area of Lushi Station in Luohe River Basin

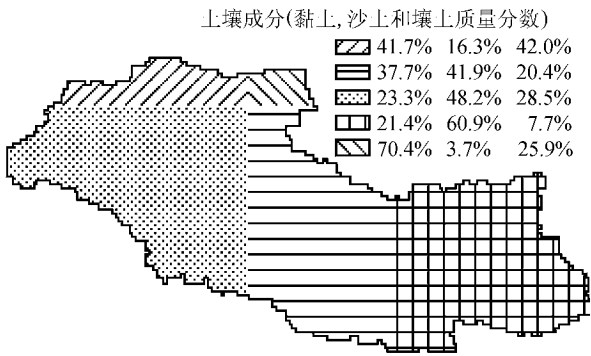


图 5 洛河卢氏以上流域的土壤成分分布

Fig.5 Soil composition of the upper area of Lushi Station in Luohe River Basin

表 1 GTOPMODEL 参数值
Table 1 Parameters for GTOPMODEL

$SR_{\max \text{树林}}/\text{m}$	$SR_{\max \text{灌木}}/\text{m}$	$SR_{\max \text{草地}}/\text{m}$	$SR_{\max \text{不透水地}}/\text{m}$	$T_0 \text{黏土}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	$T_0 \text{沙土}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	$T_0 \text{壤土}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	α	β	m	k	x	T_d/h
0.05	0.04	0.02	0.001	370	398	385	2	1	0.01	0.5	0.3	1.1

2.2 结果比较

从表 3 可见, 在洛河卢氏以上流域, GTOPMODEL 在径流深误差控制和峰现时差控制方面比 TOPMODEL 效果更好, 在洪峰误差上与 TOPMODEL 相差不大. 总体上, GTOPMODEL 在洛河卢氏以上流域的洪水模拟上比 TOPMODEL 表现要好. 至于 GTOPMODEL 是否比 TOPMODEL 更优, 需要进一步的比较研究.

表 2 TOPMODEL 参数值

Table 2 Parameters for TOPMODEL

m	$T_0/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	T_d/h	$SR_{\max}/\text{m}$	$Chv/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	$Rv/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$
0.015	388	1.1	0.05	7000	6000

表 3 2 个模型对 3 次洪水模拟结果统计对比

Table 3 Statistical characteristics of three observed and simulated floods by the two models

模型	洪水 起始时间	历时 /h	面平均总 雨量/mm	实测径流 深/mm	实测洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	峰现时 差/h	确定性 系数
GTOPMODEL	19890708T08	278	66.2	29.1	1 160	- 9.5	15.5	0	0.96
	19920913T09	456	145.7	80.2	1 440	- 12.0	20.0	0	0.90
	20030905T07	138	55.8	40.5	1 260	- 2.9	15.5	0	0.94
TOPMODEL	19890708T08	278	66.2	29.1	1 160	1.9	39.2	0	0.90
	19920913T09	456	145.7	80.2	1 440	- 15.3	- 18.0	- 1	0.86
	20030905T07	138	55.8	40.5	1 260	2.9	2.5	2	0.96

3 结 语

GTOPMODEL 是基于 DEM 栅格的一种以物理概念为依据、地形特征为基础、结构合理的分布式流域水文模型,充分地结合了地形学和水力学方法,推导出了水流运动、产流计算公式,假设合理,物理概念明确.从概念上来看,GTOPMODEL 是对 TOPMODEL 的一种改进.由于 GTOPMODEL 是按栅格依次汇流,因此可以得到河道任一栅格上的流量过程.该模型还可以应用于土壤侵蚀模拟、水质模拟等.总之,GTOPMODEL 在洛河卢氏以上流域的洪水模拟取得了较好的结果,证明其模型结构和参数的合理性.为了进一步验证模型的适用性,还需在具有不同的气候、地形和地质条件的流域中使用.

参考文献:

[1] BEVEN K J, KIRBBY M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrol Sci Bull, 1979, 24(1): 43—69.

[2] 郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型——TOPMODEL 及其拓宽应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 296—301.

[3] 熊立华, 郭生练, 胡彩虹. TOPMODEL 在流域径流模拟中的应用研究[J]. 水文, 2002, 22(5): 5—8.

[4] 孔凡哲, 芮孝芳. TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨[J]. 水科学进展, 2003, 14(11): 41—45.

[5] 刘青娥, 夏军, 王中根. TOPMODEL 模型几个问题的研究[J]. 水能源科学, 2003, 21(2): 41—44.

[6] SIVAPALAN M, BEVEN K, WOOD E F. On hydrologic similarity. 1. A scaled model of storm runoff production[J]. Water Resour Res, 1987, 23(12): 2266—2278.

[7] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage network from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323—344.

Comparison between GTOPMODEL and TOPMODEL

ZHANG Ke, LI Zhi-jia, BAO Hong-jun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :A distributed grid-based hydrological model named GTOPMODEL was developed for flood simulation. Its basic equations were obtained based on the assumptions that the saturated hydraulic conductivity of the soil varied negative-exponentially with the depth of water, and that the water table was parallel to the soil surface. The calculation methods for plants and root systems-induced interception, evapotranspiration, groundwater recharge, base flow, and runoff according to the present model were introduced and compared with those of TOPMODEL. With the data of topography, soil composition and land coverage obtained from internet, the two models were applied to the upper area of the Lushi hydrological station in the Luohe River Basin with an area of 4 716 km² for flood simulation. The results show that GTOPMODEL is better than TOPMODEL.

Key words :GTOPMODEL; digital elevation model; Yellow River Basin; TOPMODEL; distributed hydrological model