喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应

张志才,陈 喜,石 朋,魏玲娜

(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 2100%)

摘要:根据喀斯特流域多孔介质与裂隙水流特征,建立了达西流、裂隙渗流与槽蓄汇流演算相结合的混合汇流演算 模式,实现了对分布式水文2植被2土壤模型(DHSVM)的改进。利用贵州普定喀斯特生态水文试验站陈旗小流域观 测资料,对模型计算的流量过程及植被截流、蒸散发及土壤含水率时空分布进行验证。结果表明,模型能较好地模 拟喀斯特流域陡涨、陡落的流量过程。同时,模型能模拟出土壤含水率、实际蒸散发与降雨、下垫面岩溶裂隙、植 被覆盖的响应关系,对分析中国南方喀斯特地区下垫面变化条件下的生态水文效应具有重要意义。

关键 词: 喀斯特; 分布式水文2 植被2 土壤模型; 岩溶裂隙水; 生态水文

中图分类号: P64111 文献标识码: A 文章编号: 10026791(2009)0620806206

喀斯特地区土层薄、土壤贫瘠,持水能力差,生态环境脆弱。表层岩溶带以及由溶隙、溶洞、管道等多重介 质所构成的地下河系统发育,是地表水入渗和地下水储存、径流的良好通道,对雨洪产汇流起主导作用。受岩溶 裂隙影响,流域水文过程具有补给排泄迅速、水位流量季节变化剧烈等基本特点^[22]。受喀斯特地表、地下空间 异质性影响,建立符合喀斯特流域水文地质特征的分布式水文模型存在较大困难,目前基于松散介质特性建立的 分布式水文模型^[47]无法直接应用于喀斯特地区。本文利用华盛顿大学开发的分布式水文2土壤2植被模型 (DHSVM)^[8],根据计算单元内松散介质水流与裂隙水流双重介质体渗流原理,建立喀斯特流域浅层岩溶带产汇流 计算方法;根据喀斯特流域裂隙、管道及地下暗河汇流系统特征,建立各计算单元之间的水力联系,实现对 DHSVM的改进,并应用于典型喀斯特小流域。根据气象、水文过程观测资料及现场实验结果,确定模型参数,并 对水文过程模拟结果进行分项验证,进而分析喀斯特裂隙、植被覆盖对土壤水、蒸散发等时空变化影响。

1 模型原理及改进

111 模型原理

DHSVM 以地面高程模型(DEM) 网格节点为中心,流域划分为若干计算网格单元。根据网格单元地形特征, 描述短波辐射、降雨、气温和坡面流及网格单元土壤和植被特性时空变化。每一计算时段内,根据各网格的能 量和质量平衡方程联立求解,网格单元间根据坡面流和壤中流汇流演算发生水文联系^[9];根据河道分级演算, 计算河网汇流过程,实现网格尺度上流域水文过程及其与下垫面植被、土壤等影响因素的系统描述。

DHSVM 模型采用 Penman2Monteith 方法模拟上下冠层蒸发量(E_{io} 、 E_{iu}) 及上下冠层散发量(E_{to} 、 E_{tu}),结合土 壤水分条件计算土壤实际蒸发量(E_s)^[10]。

降水分别被上、下冠层植被截留,直至达到最大截留能力 I_w、I_{cu},各层截留能力分别由相应叶面积指数 (LAI)确定。

$$I_{cj} = r_j LAI_j F_j \tag{1}$$

式中 rj 为冠层截留系数; Fj 为冠层覆盖率, 下标 j 表示上(o)、下(u)冠层。

冠层截留量变化 S_{ij}^{t} 计算式为 $S_{ij}^{t+} S^{t} = S_{ij}^{t} + P + E_{ij}$ (2)

收稿日期: 200&10212

- **基金项目**: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2006CB403200); 国家自然科学基金资助项目 (50679025); 教育 部科学技术研究重大项目 (308012)
- 作者简介: 张志才(1980-), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要从事流域水文模拟研究。E2mail: zhangzhicai. 0@ hhul edul cn

式中 P 为降雨量; E_{ii}为潮湿叶面蒸发量; i 为网格序号。

采用两层(或多层)根带模式模拟水分在非饱和土壤中的运动。

$$d_{1}(\mathbf{H}^{+\,\text{St}}_{1} - \mathbf{H}_{1}) = P_{0} - P_{1}(\mathbf{H}_{1}) - E_{\text{to}} - E_{\text{tu}} - E_{\text{s}} + V_{\text{sat}} - V_{\text{r}}$$
(3)

 $d_{2}(H_{2}^{t+\$t} - H_{2}^{t}) = P_{1}(H) - P_{2}(H_{2}) - E_{to} + V_{sat}$ (4)

式中 d₁, d₂分别为上下层土壤厚度; H、H 为土壤含水率; P₀为地表入渗量; V_{sat}为地下水位变动引起的土 壤水增量; V₇为地下水位上升至地表后形成的地表径流量; P₁, P₂分别为上下土壤层入渗量。

饱和壤中流计算采用运动波方法, 坡面流则采用 Wigmosta 发展的准三维路径模式^[11]。坡面地表流、壤中 流逐网格汇流向流域低洼处汇集进入河道。

112 模型改进

喀斯特地区地表、地下裂隙发育,表层径流受岩溶带细小裂隙控制^[12]。为此,本文考虑细小裂隙对饱和 水流的汇集作用,根据岩石裸露率及风化程度确定网格单元内细小裂隙特征参数,采用裂隙渗流立方定律计算 网格单元内细小裂隙渗流过程。网格单元渗流量进入由大裂隙、管道或地下暗河共同组成的快速汇水系统,最 终流出流域出口断面(图1)。由于大裂隙或管道汇流系统多处于地形低洼处,可根据 DEM 按地表水系生成。



图 1 流域汇水网络系统 Figl 1 Network system of watershed routing

将计算单元视为多孔介质与细小裂隙并存的双重介质体,则t时刻水从网格(i,j)向其低梯度相邻网格流动速率由下式计算:

$$\mathbf{q}(\mathbf{t})_{\mathbf{j}\mathbf{k}} = \mathbf{w}_{\mathbf{j}\mathbf{k}} \mathbf{B}_{\mathbf{j}\mathbf{k}} \mathbf{T}(\mathbf{t})_{\mathbf{j}\mathbf{j}}$$
(5)

式中 q(t)_{ijk}, w_{jk}, B_{jk}分别为径流在k方向上流出网格(i, j)的速率、径流宽度及水力梯度、山区地带的水力 梯度可用地形坡度近似; T(t)_{ij}为网格(i, j)的导水率,视土壤多孔介质与细小裂隙介质确定。

$$T(t)_{ij} = \frac{K_{ij}}{f_{ij}} (e^{-f_{ij} Z_{ij}} - e^{-f_{ij} D_{ij}})$$
(6)

式中 K_{ij}为网格(i, j)的多孔介质饱和渗透系数; f_j为土壤垂向渗透能力衰减系数; D_{ij}为土壤厚度; z_j为地下 水埋深。

当水流在细小裂隙中运动时
$$T(t)_{ij} = mC \frac{Qb_{ij}^{ij}}{12G}$$
 (7)

式中 m、C 分别为计算单元内裂隙数量以及与裂隙粗糙度、宽度相关的系数; b_j为单裂隙宽度, g 为重力加速度; Q为水流密度; G为动力粘滞系数。

网格单元附近大的裂隙、管道组成的快速汇流过程采用线性槽蓄法计算,每一计算单元内汇水通道看作宽度为常数的水库,出流量 Qout与槽蓄量 Vc 成线性关系^[13]。

2 应用实例

211 流域概况及水文地质参数

当水流在多孔介质中运动时

研究区域位于贵州省普定岩溶生态实验站,选择面积为 115 km² 的陈旗小流域作为研究对象(图 2)。研究 区多年平均气温 1511 e,降雨量 1300 mm。区内具有贵州典型的峰丛山体、峰丛洼地地貌及喀斯特水文特征。

山体植被覆盖以林地、灌草和灌丛为主、洼地主要为农田。流域内多为厚层质纯灰岩、薄层灰岩、泥灰岩与白 云岩等互层。由于岩溶发育,岩层裸露现象严重,围岩多有溶隙,降雨一般经过溶隙补给岩溶地下水,径流经 地下暗河在流域出口以泉水形式排泄。



图 2 陈旗流域地形及地质

该流域于2007年6月设立生态水文观测站。在董家 山、火烧坡、阳坡山体设置气象观测站,观测降雨、气 温、气压、相对湿度、风速、辐射等气象资料、时间间隔 为5min。分别在董家山人工林地、阴坡杂交林、火烧坡 灌草和阳坡灌丛的峰丛山体上埋设土壤含水率监测探头, 探头深度为 15 cm 与 30 cm, 每 5 min 记录 1 次。董家山林 地内摆放10个筒径为29 cm 穿透雨收集筒,记录样地内 每场降雨的穿透雨量。流域出口泉眼设有水位(流量)自动 观测仪,每15min记录1次。

通过对董家山、阳坡、阴坡山体上的小生境实地调 Figl 2 Topography and geology in Chenqi watershed 查、流域植被类型划分为4种:林地、灌丛、灌草以及农 田。林地乔木层株高 2~ 5 m, 覆盖率 80%~ 90%, 岩石裸露率 20%~ 40%。灌木层株高 1~ 115 m, 覆盖率 38%~ 80%、岩石裸露率 50%~ 90%。各植被类型参数参照实地调查及陆面数据同化系统 LDAS(Land Data As2 similation System)确定。采集49个土样进行室内分析,表层(20 cm)土壤类型划分为两大类:处于洼地的壤土和 峰丛山体的砂壤土(图3),土壤上层含砾石及植物根系,较为疏松,粘土含量1%~3%,容重0166~0190g/cm³, 孔隙度 012~014; 下层为棕黄色粘土, 钙质含量高, 容重 1100~1128 g/ cm³, 孔隙度 0142~0148。利用圭尔夫渗 透仪(GUELPH) 原位测定 15 个测点的饱和渗透系数 Ks, 上层土壤为 0118~1217 m/d, 下层小于 011 m/d。



图 3 流域植被和土壤分类 Figl 3 Classification of vegetation and soil

根据对陈旗流域内地下管道在天窗露头处的调查,以及对裸露岩石裂隙的调查统计,表层岩溶带裂隙汇水 系统按裂隙大小及切割深度从大到小概化为 4 级:1、2、3 级汇流通道为粗大裂隙或管道,切割深度 1~ 3 m 裂隙宽度 01 3~ 115 m、第 4 级 为计算单元内碳酸盐岩细小裂隙、切割深度 015 m、裂隙宽度 1 mm。为保持裂隙 汇流系统水量平衡,以细小裂隙容积之和与之汇向的下1级通道(如3级)容积相等校核细小裂隙数量及下1级 汇水通道隙宽。

212 模型计算与分项验证

在1:10 000 地形图基础上,根据 DEM 划分 10 m @ l0 m 栅格,将流域划分为 113 行、150 列,合计 16 950 个 网格单元。模型计算的模拟期为 2007 年 7 月 28 日 0 时至 10 月 19 日 13 时,时间步长取 1 h,共 2 006 个计算时 段,计算期内主要有4场洪水过程。利用室内及原位实验确定的土壤水力特性参数(孔隙度、田间持水率、饱和 含水率、饱和渗透系数等),根据模型计算与实测流域出口断面流量过程对模型其它参数(式(6)中fi、式(7)中 m、C等)进一步率定,再根据流域内观测的植被截留量、土壤含水率进行分项验证。

模型计算出口断面流量与实测流量对比见图 4,均方根误差为 0105 m³/s,效率系数 R²= 01829,水量平衡相 对误差 5%,模型能较好地模拟喀斯特流域快速涨水、退水过程。以 7 月 30 日暴雨洪水过程模拟为例(图 4),与 不考虑计算单元内裂隙渗流相比,裂隙渗流明显影响土壤水的滞留,进而影响产汇流及蒸散发量。整个模拟过 程考虑与不考虑非均质裂隙渗透时,平均土壤含水率上层分别为 01 135 与 01158,下层分别为 01 368 与 01 390; 平均蒸散发量分别为 01 047 mm/h 与 01 07 mm/h,增加 481 9%。说明非均质裂隙增加了单元介质体渗透性,减小 了土壤持水量及实际蒸散发量,进而增加雨洪径流量。

利用式(1)、式(2)计算的林地植被截留与计算期内 8 场降雨(614~9014 mm) 观测的林地截流率相比,两者相关性较好(图 5),计算期内林地截留率变化范围为 3%~25%。



图 5

图 4 考虑与不考虑裂隙渗流的暴雨洪水模拟对比





植被截留模拟及观测值相关分析

进一步对比分析 4 个观测点相同深度的实测与模拟土壤含水率(图 6)。由于模拟的土壤含水率是 10 m @10 m 网格单元内的平均值,而实测值代表单点土壤含水率,且喀斯特流域空间异质性强,其绝对值存在差异,为 消除均值影响,同时保留不同下垫面条件下土壤水动态变化与气象变化的响应关系,本文对模拟与实测土壤含 水率数据进行标准化处理: x = (x-x)/x,其中 x 为数据序列xi 的均值, xi 为标准化结果。图 6 显示实测与计



图 6 实测与模拟上层土壤含水率标准化结果对比

Fig 6 Comparing standardized results of observed and simulated soil moisture content

算序列变化较一致。

213 植被生态水文响应分析

针对一场日降雨量 9014 mm 过后(7月 30 日 12 时)和连续 6d 无雨后(8 月 11 日 12 时)两种情形,利用建立的模型分析植被覆盖对降雨截流、土壤水、蒸散发的影响。

该场 9014 mm 暴雨过后,林地植被截留量为 216 mm。上层(15 cm)土壤含水率模拟值空间统计结果显示,在 相似山坡地形条件下,林地平均土壤含水率(01280)与灌丛土壤含水量(01284)较为接近。受地形及土壤特性影 响,在洼地土层较厚的农田,土壤含水率(01295)较高。

对连续 6 d 无雨 后模型计算的 实际蒸散发量进行分析,林地、灌丛、裸地实际 蒸散发量 分别为 01053、01016 和 01012 mm/h,说明林地实际蒸散发量远大于灌丛及裸地。从表层土壤蒸发量来看,林地与非林地表层 土壤蒸发量分别为 01007 和 01014 mm/h。说明受林地茂密冠层遮盖影响,林地表层土壤蒸发明显小于非林地。 对应时间林地、灌丛、裸地上层土壤含水率分别为 0115、0107、0105。说明林地植被覆盖具有保水作用,上层 土壤含水率大于非林地。

与上层土壤水分空间变化剧烈相比,下层变化较小。林地、灌丛、裸地下层土壤含水率平均值分别为 0132、0137、0134。受植被根系蒸散发作用影响,林地下层土壤含水率小于灌丛和裸地。

3 结 论

本文根据喀斯特表层岩溶带水文地质特征,对分布式水文模型进行改进,建立了土壤松散介质、裂隙、地下管道流相互联系的汇水网络系统。改进的模型能较好地模拟喀斯特流域土壤水分、蒸散发及径流过程,反映喀斯特山区小流域地质、地貌结构及植被覆盖对水文循环的影响。结果表明,裂隙渗流明显减少土壤滞留水量,上层土壤含水率减少1415%,下层土壤含水率减少516%。裂隙渗流极大增加了雨洪径流量,洪峰流量增加348%。植被覆盖增加实际蒸散发,但对表层土壤具有保水作用。相对于灌丛、裸地,林地实际蒸散发量分别增加01037与01041 mm/h,表层土壤含水率分别增加0108 与0110。该研究可为喀斯特地区覆被及土地利用影响下生态水文过程变化规律及生态恢复措施提供参考依据。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所,贵州省科技厅普定岩溶地质与生态研究综合试验站王世杰研究员、曾成、杨涛、彭韬博士;水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员在数据方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] 何师意,冉景丞,袁道先,等.不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J]1 地球学报,2001,22(3):26522701(HE Sh2yi, RAN Jing cheng, YUAN Dao2xian, et all A comparative study on hydrological and ecological effects in different karst ecosystems[J]1 Acta Geosic2 entia Sinica, 2001, 22(3):26522701(in Chinese))
- [2] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]1 地球学报, 2001, 22(2):15921641(YAO Chang hong, JIANG Zhong) cheng, YUAN Da@xianl Vegetation karst effects on the karst area of southwest China[J]1 Acta Geosicientia Sinica, 2001, 22(2):15921641 (in Chinese))
- [3] Michaud J, Sorooshian SI Comparison of simple versus complex distributed runoff model on a midsized semiarid watershed [J]1 Water Resource Research, 1994a, 30(3): 592 6051
- [4] 任立良, 刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[J]1 地理研究, 2000, 19(4): 362 3761 (REN L2 liang, LIU Xin2 renl Hydrological processes modeling based on digital elevation model[J]1 Geographical Research, 2000, 19(4): 362 3761 (in Chinese))
- [5] 刘昌明,夏军,郭生练,等.黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]1 水科学进展,2004,15(4):4925001(LIU Chang ming, XIA Jun, GUO Sheng lian, et all Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow River basin[J]1 Advances in Water Sciences, 2004, 15(4):49525001(in Chinese))
- [6] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]1 水科学进展, 2004, 15(4): 51725201 (XIONG L2 hua,

GUO Shenglian, TIAN Xiangrongl DEM2based distributed hydrological model and its application[J]1 Advances in Water Sciences, 2004, 15 (4): 51725201 (in Chinese))

- [7] 余钟波, 潘峰, 梁川, 等. 水文模型系统在峨嵋河流域洪水模拟中的应用[J]1 水科学进展, 2006, 17(5):6426521 (YU Zhong bo, PAN Feng, LIANG Chuan, et all Application of hydrologic model system to the flood simulation in the Emei stream watershed[J]1 Advances in Water Sciences, 2006, 17(5):6426521 (in Chinese))
- [8] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D Pl A distributed hydrolog/2 vegetation model for complex terrain [J]1 Water Resource Research, 1994, 30(6): 1665216791
- [9] Louis Cl A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses [R]1 Rock Mech Res Rep 10, Imp Coll London, 1969: 912981
- [10] Eagleson P SI Climate, soil, and vegetation 3: A simplified model of soil moisture movement in the liquid phase [J] 1 Water Resource Re2 search, 1978, 14(5): 72227301
- [11] Wigmosta M S, Perkins W A1 Simulating the effects of forest roads on watershed hydrology[C] // Wigmosta M S, Burges S J1 Influence of Ur2 ban and Forest Land Use on the Hydrologic Geomorphic Responses of Watersheds1 AGU Water Science and Applications Series, 20011
- [12] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]1 中国岩溶, 2005, 24(3): 25022541 (QIN Xia2 qun, JIANG Zhong cheng A review on recent advances and perspective in epikarst water study[J]1 Carsologica Sinica, 2005, 24(3): 25022541 (in ChD nese))
- [13] BEVEN K J, FISHER J II Remote sensing and scaling in hydrology[C]//Stewart J Bl Scaling Issues in Hydrologyl Wiley: Chichester, 19961

Distributed hydrological model and eco2hydrological effect of vegetation in Karst watershed^x

ZHANG Zh2cai, CHEN Xi, SHI Peng, WEI Ling2na

(State Key Laboratory of Hydrology2Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of the characteristics of the porous and fissure water flow in the karst watershed, a mixed runoff rout2 ing method integrating interactions of the Darcy flow, fissure flow and channel storage routing, is developed and used to im2 prove the Distributed Hydrolog₂Soil2Vegetation Model (DHSVM)1 The improved model is applied in a small watershed of Chenqi with in the Puding Karst Ecohydrological Observation Station, Guizhou provincel The model is calibrated and validated based on the observation data of the stream flow, the vegetation interception, the evapotranspiration and the soil moisture1 The results show that this improved DHSVM is able to simulate the observed hydrograph with sharply raised and recessed flow char2 acteristics, as well as evapotranspiration and soil moisture1 The improved DHSVM is also able to simulate soil moisture content and evapotranspiration as well as their interactions with precipitation, karst fracture and vegetation cover1 This study is very useful for analyzing the eco2hydrological processes and the eco2environmental effects with the changing land cover and land use in the Karst region Southern Chinal

Key words: Karst; Distributed Hydrology2Soi2Vegetation Model (DHSVM); Karst fractural flow; eco2hydrology

X The study is financially supported by the National Basic Research Program of China(Nol 2006 CB403200) and National Natural Science Foun2 dation of China (Nol 50679025)1