

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.006

栅格岩溶分布式水文模型

张珂^{1,2,3,4}, 周佳奇^{1,3}, 张企诺^{1,3}, 陈新宇³, 晁丽君^{1,3}, 姚成³, 李致家³

(1. 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;

2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

4. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为提高岩溶区洪水的模拟精度,基于自由水蓄水库和线性水库的概念,提出了考虑表层岩溶带与深层地下溶隙调蓄作用下的降水-径流分布式模拟方法。在栅格新安江模型的基础上引入表层岩溶带及深层地下溶隙调蓄模块,构建了栅格岩溶分布式水文模型,并将该模型和栅格新安江模型应用于典型岩溶流域(普厅河流域)进行对比分析。结果表明:栅格岩溶分布式水文模型在普厅河流域的模拟精度高于栅格新安江模型,20场洪水的平均径流深误差降低了4.92%,平均洪峰误差降低了3.59%,平均确定性系数提升了0.23;基于栅格的表层岩溶带自由水蓄水库及深层地下溶隙线性水库可根据流域岩溶发育的空间分布情况,对表层岩溶带和深层地下溶隙调蓄过程进行精确模拟;栅格岩溶分布式水文模型的参数空间分布考虑了流域的石漠化情况,模拟的径流成分较栅格新安江模型更加合理,能有效提高普厅河流域的洪水模拟精度。

关键词:栅格岩溶分布式水文模型;岩溶地区;表层岩溶带;降水径流模拟;石漠化;普厅河流域

中图分类号:P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0043-09

Grid-based karst distributed hydrological model // ZHANG Ke^{1,2,3,4}, ZHOU Jiaqi^{1,3}, ZHANG Qinnuo^{1,3}, CHEN Xinyu³, CHAO Lijun^{1,3}, YAO Cheng³, LI Zhijia³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study aims to improve the flood simulation accuracy in karst areas. Based on the concepts of freewater reservoir and linear reservoir, a distributed rainfall-runoff simulation method was proposed to consider the regulation effect of epikarst and deep subsurface fracture on water storage. A grid-based karst distributed hydrological model (GKDHM) was established by introducing the water storage modules of epikarst and deep subsurface fracture into the grid-Xin'anjiang (GXAJ) model. The GKDHM was further tested through its application to a typical karst-dominated watershed, the Puting River Watershed. The results show that the simulation accuracy of the GKDHM in the Puting River Watershed is apparently higher than that of the GXAJ model, and compared to the GXAJ model, the GKDHM decreased the average relative runoff error of 20 flood events by 4.92%, decreased the average relative flood peak error by 3.59%, and increased the average deterministic coefficient by 0.23. With the GKDHM, the water storage regulation effects of epikarst and deep subsurface fracture can be accurately simulated using distributed freewater reservoirs of epikarst and linear reservoirs of deep subsurface fractures when detailed information of the spatial distribution of karst-dominated area is available. The GKDHM is also capable of well considering the rocky desertification of the watershed through rational determination of the spatial distribution of its parameters. The simulated runoff components by the GKDHM are apparently more reasonable than those by the GXAJ model. In conclusion, the developed GKDHM can effectively improve the accuracy of flood simulation in the Puting River Watershed.

Key words: grid-based karst distributed hydrological model; karst areas; epikarst; rainfall-runoff simulation; rocky desertification; Puting River Watershed

全球岩溶面积约为 220 万 km^2 , 岩溶区居住人口约 10 亿人。中国西南部是世界上岩溶发育最典型的地区之一, 具有集中连片的岩溶地貌, 分布面积约 54 万 km^2 ^[1-2]。由于石漠化、植被稀少等原因, 岩溶流域的土层厚度、土地覆盖类型等下垫面条件空间异质性大, 流域内岩溶裂隙发育程度不同, 导致了流域产汇流机制复杂, 洪水模拟难度大。岩溶流域中的表层岩溶带以及地下深层溶隙、溶洞等都是地表水入渗、地下水赋存和运移的良好介质, 在产汇流过程中起着重要作用, 探究地表水-岩溶水-土壤水的转化和产汇流规律十分必要。许波刘等^[3]将岩溶裂隙概化为 5 种, 推导了 5 种裂隙的瞬时单位线公式, 改进了新安江模型的汇流; Zhou 等^[4]将集总式新安江模型和两种基于蓄水库的岩溶模型结合起来, 建立了岩溶新安江模型 (K-XAJ), 在漓江流域的日径流模拟中取得了较好的效果; Jeannin^[5]在 Holloch 洞穴根据观测到的水位、流量、岩溶管道规模以及管道长度建立了水动力模型, 该模型可以很好地模拟以管道流为主的岩溶系统; 张志才等^[6]根据喀斯特流域多孔介质与裂隙水流特征, 改进了分布式水文-植被-土壤模型 (DHSVM), 并在贵州普定喀斯特水文试验站取得了较好的模拟效果。随着遥感技术在水文领域的不断应用^[7-8], 一些学者通过遥感影像分析了岩溶流域石漠化情况^[9]。大部分学者将不同发育程度的岩溶裂隙概化为地下溶隙线性水库来构建集总式岩溶水文模型, 而构建的分布式概念性岩溶水文模型主要用于日径流和月径流的模拟, 构建的岩溶水力学模型需要较为精细的资料, 一般用于实验小流域的水文模拟。此外, 还有一些研究将机器学习和智能模型用于水文模拟^[10-11]。

岩溶流域下垫面空间异质性较大, 其洪水过程的精确模拟难度大。集总式的岩溶水文模型难以刻画流域下垫面条件的复杂性^[3-4]; 水动力岩溶模型在实验小流域模拟效果好, 但是需要精细的数据资料, 且对于面积更大的中小河流域, 模型的洪水模拟计算量庞大^[5-6, 12-13]。分布式和半分布式概念性岩溶模型可以在考虑下垫面异质性的同时简化计算, 但是目前分布式岩溶模型大部分被用于日径流和月径流的模拟, 用于场次洪水模拟的分布式岩溶模型较少^[14-17]。针对以上问题, 本文在栅格新安江模型 (grid-Xin'anjiang model, GXAJ 模型)^[18]基础上, 加入了表层岩溶带自由水蓄水库和深层地下溶隙线性水库, 构建了栅格岩溶分布式水文模型 (grid-based karst distributed hydrological model, GKDHM 模型), 并检验了该模型在典型岩溶流域 (普厅河流域) 的应用效果。

1 研究方法

1.1 岩溶地貌影响下的降水径流模拟

本文研究的岩溶地貌对流域水文过程的影响主要包括表层岩溶带的调蓄过程以及深层地下溶隙对地下径流的调蓄作用。通过构建表层岩溶带自由水蓄水库和深层地下溶隙线性水库刻画岩溶地区的产汇流过程。

1.1.1 表层岩溶带与深层地下溶隙调蓄

图 1 为降水经过土壤和表层岩溶带调蓄形成水流的示意图。表土层水分下渗进入表层岩溶带, 表层岩溶带水分向下渗透, 部分进入深层地下水系统, 部分由于表层岩溶带下部垂向渗透性减小而形成侧向水流^[19]。

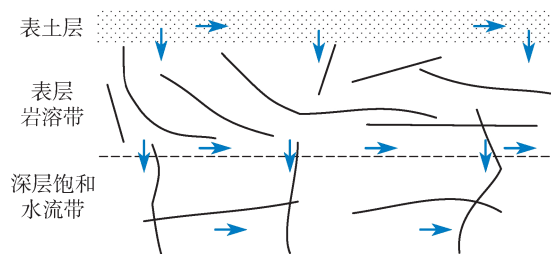


图 1 土壤与表层岩溶带水流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water flow in soil and epikarst

基于流域岩溶发育情况和石漠化情况, 采用图 2 所示的表层岩溶带自由水蓄水库模拟表层岩溶带蓄水作用以及出流过程。通过流域岩溶发育情况判断栅格内是否有岩溶发育, 无岩溶发育的栅格采用图 2(a) 的自由水蓄水库来刻画, 对于岩溶发育栅格, 存在石漠化 (图 2(b)) 和未石漠化 (图 2(c)) 两种情况, 壤中流 (Q_1) 为上层土向下层土下渗过程中由于渗透性变弱而产生的侧向径流^[20], 石漠化岩溶区土壤层较薄, 故认为石漠化岩溶栅格无壤中流, 未石漠化岩溶栅格存在壤中流^[4]。根据流域石漠化情况, 石漠化栅格采用图 2(b) 的自由水蓄水库来刻画, 未石漠化的栅格采用图 2(c) 的结构。

图 1 中表土层的调蓄过程通过图 2 中蓄水容量为 S_M 的自由水蓄水库模拟, 图 1 中表层岩溶带的调蓄过程通过图 2 中蓄水容量为 S_{MEK} 的自由水蓄水库模拟, 表土层位于表层岩溶带上部, 蓄水容量为 S_M 和 S_{MEK} 的两个自由水蓄水库为串联关系, 水流经表层土自由水蓄水库渗入表层岩溶带自由水蓄水库。图 1 深层饱和水流带中发育的深层地下溶隙, 许多研究将其概化为地下溶隙线性水库^[3, 21], 本文采用同样的方法构建图 2(b) 和图 2(c) 中消退系数为 C_{KG} 的地下溶隙线性水库, 模拟深层地下溶隙对地下径流的调蓄作用。

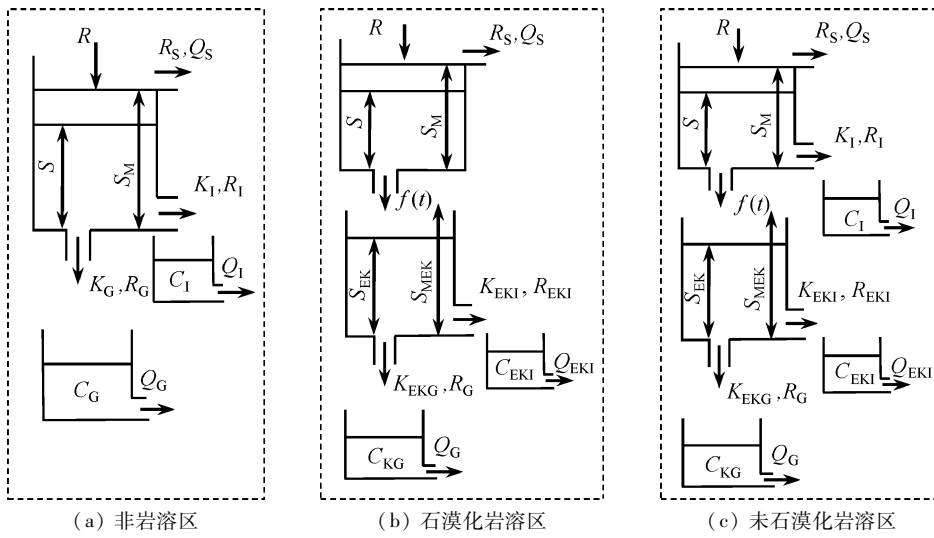


图2 表层岩溶带自由水蓄水库示意图

Fig.2 Schematic diagram of freewater reservoirs of epikarst

a. 降水经过植被截留,满足张力水蓄水容量后,剩余的雨量进入土壤自由水蓄水库。在岩溶区域内土壤自由水通过渗透过程补给表层岩溶带自由水蓄水库,渗透过程用格林-安普特公式描述^[22-23]:

$$f(t) = K \left(1 + \Delta\theta \frac{\Psi}{F(t)} \right) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为栅格土壤自由水蓄水库下渗能力, mm/h; K 为栅格饱和水力传导度, mm/h; Ψ 为栅格湿润锋处土壤吸力, mm; $\Delta\theta$ 为栅格土壤饱和含水率与初始含水率之差, %; $F(t)$ 为栅格累计渗漏量, mm; t 为时间, h。

b. 表层岩溶带自由水蓄水库对下渗的土壤自由水进行调蓄。定义表层岩溶带侧向径流量为 R_{EKI} ,表层岩溶带自由水蓄水库对地下水的日出流系数为 K_{EKG} , R_{EKI} 和岩溶区域地下径流 R_G 的计算公式如下:

$$\begin{cases} R_{EKI} = K_{EKI} S_{EK} \\ R_G = K_{EKG} S_{EK} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{EKI} 为表层岩溶带自由水蓄水库对表层岩溶带侧向出流的日出流系数; S_{EK} 为表层岩溶带自由水蓄水量, mm。

c. 栅格内表层岩溶带侧向径流采用线性水库进行汇流计算。对于存在岩溶发育的栅格,引入岩溶地下径流消退系数,反映深层地下溶隙与非岩溶区对地下径流调蓄的差异,计算公式为

$$Q_{EKI,t} = C_{EKI} Q_{EKI,t-1} + (1 - C_{EKI}) R_{EKI} U \quad (3)$$

$$Q_{G,t} = C_{KG} Q_{G,t-1} + (1 - C_{KG}) R_G U \quad (4)$$

式中: $Q_{EKI,t}$ 、 $Q_{EKI,t-1}$ 分别为 t 和 $t-1$ 时刻表层岩溶带侧向出流, m^3/s ; $Q_{G,t}$ 、 $Q_{G,t-1}$ 分别为 t 和 $t-1$ 时刻地下径流, m^3/s ; C_{EKI} 为表层岩溶带侧向出流消退系数; C_{KG} 为岩溶区地下径流消退系数; U 为单位换算

系数。

1.1.2 表层岩溶带蓄水容量空间分布

20 世纪 70 年代 Mangin 首先用表层岩溶带代表岩溶包气带上部相对含水比较丰富的部分^[24]。随着对表层岩溶带的深入研究,表层岩溶带成为岩溶学的重要概念。覃小群等^[25]认为表层岩溶带是地表和地下各种岩溶形态构成的不规则带状强岩溶化层。

表层岩溶带在岩溶发育区域普遍存在。对于表层岩溶带的厚度,众多研究表明,在地形平缓的地带,如洼地、岩溶谷地和岸坡等地带,表层岩溶带发育程度较好;在山顶山脊等陡坡地带,表层岩溶带发育规模较小^[2,25-26]。

水的侵蚀性是影响表层岩溶带空间差异的重要因素。地形影响区域水循环过程,进而影响岩溶动力过程,对表层岩溶带发育产生重要影响。山坡土壤水有向洼地汇集的趋势,在地势低凹地区土壤含水量相对较高,增加了水流溶蚀时间,促进了表层岩溶带向深部发育^[2]。在岩溶峡谷两侧地带和缓坡部位由于其边坡的风化裂隙较其他地貌部位发育强烈,特别是河流两岸岸壁临空面,大气降雨可迅速进入岩体内,大量水流快速进入岩体具有强大的侵蚀力,使得该区域表层岩溶带发育较深。在山顶山脊及陡坡地带,地形陡峭,降雨入渗条件差,雨水多形成坡面流失,雨水侵蚀的概率较小、时间较短,这些地段表层岩溶带发育较浅^[26]。

地形指数反映的是径流在流域中的累计趋势以及重力使径流顺坡移动的趋势^[27],平缓地区的地形指数大,在山顶山脊等陡坡地带地形指数较小^[28]。在岩溶发育区域内建立表层岩溶带与地形指数的线性关系,假设岩溶发育区域内地形指数最大的栅格

对应的表层岩溶带蓄水容量最大,地形指数最小的栅格对应的表层岩溶带蓄水容量最小,即

$$\begin{cases} \zeta_a T_{lmax} + \zeta_b = S_{MEKmax} \\ \zeta_a T_{lmin} + \zeta_b = S_{MEKmin} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{lmax} 、 T_{lmin} 分别为岩溶发育区域内栅格地形指数中的最大和最小值; S_{MEKmax} 、 S_{MEKmin} 分别为表层岩溶带自由水蓄水容量最大和最小值, mm; ζ_a 、 ζ_b 为线性关系的两个系数。

基于数字高程计算得到的每个栅格的地形指数 T_l , 通过率定 S_{MEKmax} 和 S_{MEKmin} 并结合式(5) 计算得到 ζ_a 与 ζ_b 后, 基于下式可以计算每个栅格的表层岩溶带自由水蓄水容量 S_{MEK} :

$$S_{MEK} = \zeta_a T_l + \zeta_b \quad (6)$$

1.2 GKDHM 模型

许多研究表明岩溶流域产流机制为蓄满产流^[29-30], 部分适用于岩溶流域降水径流模拟的水文模型是在新安江模型基础上改进而来的^[34,21]。本文在 GXAJ 模型的基础上, 通过引入表层岩溶带自由水蓄水库构建了 GKDHM 模型, 其结构见图 3。石漠化岩溶区土壤层薄, 采用二层蒸散发计算方法模拟蒸散发^[20,31], 未石漠化岩溶区和非岩溶区采用三层蒸散发计算方法模拟蒸散发。岩溶发育区域土壤下渗补给表层岩溶带自由水的过程采用格林-安普特公式模拟。由于石漠化区域土壤发育差, 故认为石漠化岩溶区无壤中流, 岩溶区域深层地下溶隙对汇流过程的影响通过引入考虑岩溶区域地下水消退系数的地下溶隙线性水库进行模拟。

图 3 中地面径流 1、壤中流 1 和地下径流 1 分别为非岩溶区域的地面径流、壤中流以及地下径流, 对应图 2(a) 中的地表径流 Q_s 、壤中流 Q_l 和地下径流

Q_G 。图 3 中的未石漠化土壤壤中流 2 是岩溶区中未石漠化地区的壤中流, 对应图 2(c) 中的壤中流 Q_l 。图 3 中地面径流 2、表层岩溶带侧向出流和地下径流 2 分别是岩溶区的地面径流、表层岩溶带侧向出流和地下径流, 对应图 2(b) 和(c) 中的地表径流 Q_s 、表层岩溶带侧向出流 Q_{EKI} 和地下径流 Q_G 。

GKDHM 模型在 GXAJ 模型基础上新增了以下参数: 用于格林-安普特公式的饱和水力传导度 f_c 、土壤孔隙度 n 、土壤有效孔隙度 θ_e 、湿润锋处土壤吸力 Ψ (可以根据土壤性质得到)、表层岩溶带自由水蓄水容量 S_{MEK} (取值范围 10 ~ 50 mm)、表层岩溶带自由水蓄水库对表层岩溶带侧向出流的日出流系数 K_{EKI} 、表层岩溶带自由水蓄水库对地下水的日出流系数 K_{EKG} 、表层岩溶带侧向出流消退系数 C_{EKI} (取值范围 0.930 ~ 0.998)、岩溶区地下径流消退系数 C_{GK} (取值范围 0.920 ~ 0.998)、表层岩溶带侧向出流马斯京根法汇流参数 K_{EEK} 、和表层岩溶带侧向出流马斯京根法汇流参数 X_{EEK} (取值范围 0 ~ 0.5)。参数取值参考了新安江模型参数、GXAJ 模型参数以及相关研究成果^[4,20-21,31-32]。国内外许多研究表明, 表层岩溶带的透水性随着表层岩溶带的深度增大而降低^[2,33], 对于反映表层岩溶带透水性的参数 K_{EKI} 和 K_{EKG} , 假设 K_{EKI} 与 K_{EKG} 之和同表层岩溶带厚度呈线性关系, 通过率定 K_{EKI} 与 K_{EKG} 之和的最大值与最小值, 即可确定 K_{EKI} 与 K_{EKG} 之和的空间分布, 假设 K_{EKI} 与 K_{EKG} 的比例为一个常数, 通过率定该常数即可确定流域 K_{EKI} 和 K_{EKG} 的空间分布。马斯京根法汇流参数参考了姚成^[28] 对 GXAJ 模型马斯京根法汇流参数的研究。未介绍的参数可参考 GXAJ 模型^[27,32,34]。

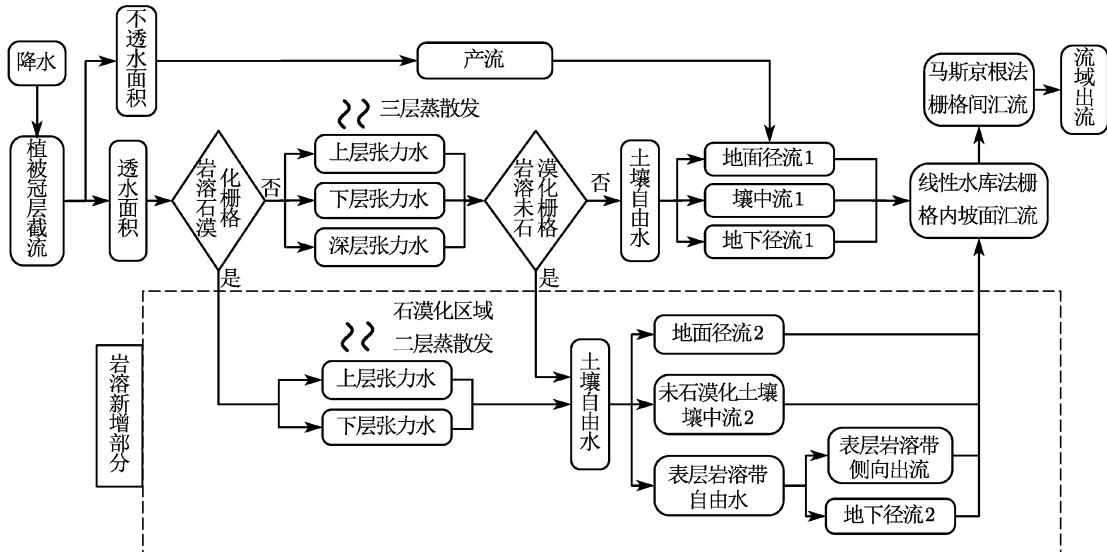


图 3 GKDHM 模型结构

Fig. 3 GKDHM structure

2 研究区概况与数据资料

2.1 研究区概况

以云南省文山壮族苗族自治州富宁县范围内的普厅河为研究区,普厅河属珠江流域西江水系右江二级支流,发源于富宁县花甲乡戈博村附近,于罗村口汇入右江。普厅河流域(23°30'N~23°50'N,105°20'E~105°40'E)是典型的滇东南岩溶高原与广西盆地间的过渡地带。富宁站多年平均径流量1.66 亿 m³ (1984—2014 年),多年平均降水量1088 mm(1984—2014 年)。普厅河流域为南亚热带季风气候,水汽主要来自印度洋孟加拉湾的西南暖湿气流和太平洋南海或北部湾的东南暖湿气流,具有明显季节性,年平均气温 19.3℃,最高月平均气温 25.2℃,最低月平均气温 10.8℃。流域内建有清华洞水库,该水库为中型水库,于 2006 年建成验收。富宁水文站以上控制面积为 373 km²,流域内设置 4 处雨量站(图 4)。

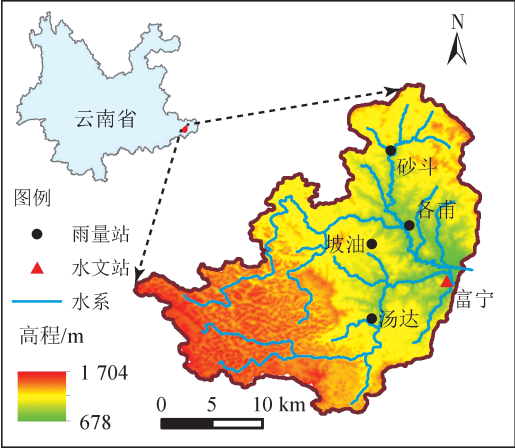


图 4 普厅河流域概况

Fig.4 General situation of Puting River Watershed

2.2 数据资料

a. 水文气象资料。普厅河流域流量、降水量、蒸发量等水文气象资料由云南省水文局提供,研究所用资料包括日尺度和小时尺度的站点降水、日尺度的站点蒸发、日尺度和小时尺度的富宁水文站流量资料,资料范围为 1984—2014 年。普厅河流域于 2006 年修建了清华洞水库,由于没有水库调度资料,并且流域面积较小,流域出口流量受水库修建以及水库蓄泄洪水的影响大,故选取了 1984—2003 年的数据用于模型模拟。

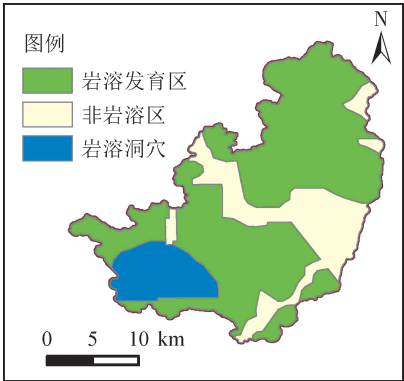
b. 下垫面资料。表 1 列出了普厅河流域各类土壤所对应的格林-安普特公式下渗参数值。GKDHM 模型所需的新增流域下垫面信息为流域岩溶发育情况与石漠化情况。根据地质云 (<http://geocloud.cgs.gov.cn/>) 平台的《西南岩溶区石漠化

分布图》和《中国南部及东南亚地区岩溶发育程度图》,对地质图进行配准提取和矢量化得到图 5。其余所需的下垫面信息与 GXAJ 模型相同,所有下垫面信息栅格尺度为 1 km×1 km。

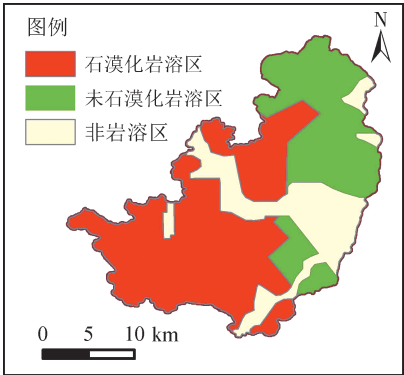
表 1 普厅河流域格林-安普特公式下渗参数值

Table 1 Infiltration parameters for Green-Ampt infiltration equation of Puting River Watershed

土壤类型	饱和水力传导度/(cm·h ⁻¹)	土壤总孔隙度	土壤有效孔隙度	湿润锋处土壤吸力/cm
粉壤土	0.65	0.501	0.486	16.68
壤土	0.34	0.463	0.434	8.89
砂质黏壤土	0.15	0.398	0.330	21.85
黏土	0.03	0.475	0.385	31.63



(a) 流域岩溶分布



(b) 流域石漠化情况

图 5 GKDHM 模型新增下垫面信息

Fig.5 Newly added underlying surface information required by GKDHM

3 结果与讨论

3.1 模拟结果比较

模型模拟结果采用径流深合格率、洪峰合格率、确定性系数 3 个指标进行评估(表 2),合格标准参考 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》。选取 1984—2003 年的 20 场洪水,其中前 12 场洪水用于率定模型参数,后 8 场洪水用于验证模拟结果。

在径流深模拟方面,GKDHM 模型有较好的模拟效果,率定期合格率 75.0%,验证期合格率 75.0%,

表 2 普厅河流域模拟结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of Puting River Watershed

模型	径流深合格率/%		洪峰合格率/%		平均确定性系数		确定性系数大于 0.5 的洪水场数		确定性系数大于 0.7 的洪水场数	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
GXAJ	58.3	50.0	50.0	50.0	0.59	-0.22	9	2	4	1
GKDHM	75.0	75.0	50.0	62.5	0.62	0.33	9	4	4	1

相较于 GXAJ 模型率定期 58.3% 和验证期 50.0% 的合格率有显著提升。GKDHM 模型率定期和验证期平均相对误差分别为 15.5% 和 17.5%，对比 GXAJ 模型的 18.6% 和 25.1%，GKDHM 模型 20 场洪水的平均径流深误差降低了 4.92%。

普厅河流域为山区中小流域，较大的洪峰易导致泥石流、滑坡等灾害的发生，能够准确模拟洪峰十分重要。对于洪峰模拟，GKDHM 模型率定期合格率 50.0%，平均相对误差 25.5%，验证期合格率 62.5%，平均相对误差 20.5%；GXAJ 模型率定期合格率 50.0%，平均相对误差 26.7%，验证期合格率 50%，平均相对误差 27.5%。GKDHM 模型有效地提升了洪峰模拟合格率，20 场洪水平均洪峰误差降低了 3.59%。

总体来看，GKDHM 模型的模拟效果优于 GXAJ 模型。率定期和验证期的平均确定性系数，GKDHM 模型的结果都高于 GXAJ 模型的结果。20 场洪水中 GKDHM 模型模拟结果确定性系数大于 0.5 的场次为 13 场，GXAJ 模型为 11 场。确定性系数的提升表明 GKDHM 模型能更好地模拟洪水过程。GKDHM 模型分布式结构能更准确地反映岩溶流域空间异质性较大的下垫面情况对产汇流的影响。

3.2 模型参数分析

由于岩溶发育和耕地开垦，普厅河流域的西部山地上出现了一定程度的石漠化现象（图 5(b)）。在 GKDHM 模型计算栅格张力水容量 W_M 和自由水蓄水容量 S_M 的过程中，为反映石漠化区域土壤贫瘠的下垫面特征，将石漠化区域和非石漠化区域分开计算，石漠化区域 $\bar{W}_M$ 为 76 mm、 $\bar{S}_M$ 为 10 mm。GXAJ 模型石漠化区域的 $\bar{W}_M$ 为 94 mm、 $\bar{S}_M$ 为 20 mm。流域整体平均 $\bar{W}_M$ 和 $\bar{S}_M$ 见表 3。GXAJ 模型与 GKDHM

模型在普厅河流域整体平均 $\bar{W}_M$ 和 $\bar{S}_M$ 相近，GKDHM 模型 W_M 和 S_M 参数的空间分布更能反映流域石漠化区域土壤贫瘠的特征。

流域表层岩溶带自由水蓄水容量空间分布见图 6，可见在地形平缓的河谷和岸坡等地区表层岩溶带自由水蓄水容量大，而蓄水容量较小的区域集中在上游山脊等陡坡地带，与前文所述表层岩溶带发育规律相符。图 6 所示岩溶发育区域数据取平均后即表 3 中的 S_{MEK} 。

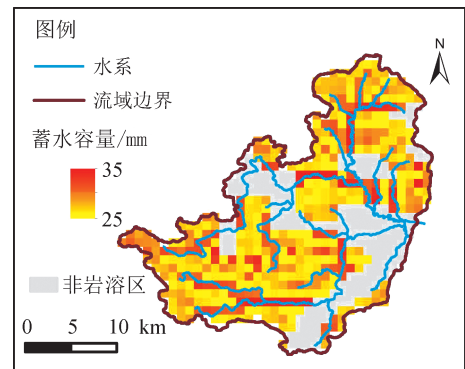


图 6 表层岩溶带自由水蓄水容量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of free water storage capacity of epikarst

表 3 中 $\bar{K}_{EKG}$ 和 $\bar{K}_{EKI}$ 分别由图 7(a)(b) 有值区域取平均得到。如前文所述， K_{EKG} 和 K_{EKI} 反映表层岩溶带的渗透性，许多研究表明表层岩溶带的渗透性随着深度增加而降低，所以在表层岩溶带较深的地方，即地势较为平缓的河道岸坡等地，表层岩溶带整体上的渗透性小于表层岩溶带较浅的地域。如图 7 所示，在表层岩溶带较深区域即图 6 中蓄水容量较大的区域， K_{EKG} 和 K_{EKI} 较小。图 7 反映出 K_{EKG} 比 K_{EKI} 整体上数值要大， K_{EKG} 反映的是表层岩溶带垂向对地下水的渗透性， K_{EKI} 反映的是表层岩溶带侧向的

表 3 普厅河流域模型参数率定结果

Table 3 Calibrated parameters of model for Puting River Watershed

模型	$\bar{W}_M/\text{mm}$	$\bar{S}_M/\text{mm}$	$\bar{S}_{MEK}/\text{mm}$	K_C	$\bar{K}_{EKI}$	$\bar{K}_{EKG}$	C	C_S	L/h	C_I	C_G	C_{EKI}
GXAJ	104	23		0.98			0.2	0.94	0	0.7	0.98	
GKDHM	100	18	28	0.98	0.26	0.61	0.2	0.924	0	0.5	0.98	0.94
模型	C_{GK1}	C_{GK2}	K_{ECH}	K_{ES}	K_{EI}	K_{EG}	K_{EEK}	X_{ECH}	X_{ES}	X_{EI}	X_{EG}	X_{EEK}
GXAJ			0.08	0.15	0.2	0.2		0.02	0.02	0.01	0.01	
GKDHM	0.95	0.93	0.05	0.1	0.2	0.2	0.2	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

注： $\bar{W}_M$ 、 $\bar{S}_M$ 、 $\bar{S}_{MEK}$ 、 $\bar{K}_{EKI}$ 、 $\bar{K}_{EKG}$ 为流域内所有栅格 W_M 、 S_M 、 S_{MEK} 、 K_{EKI} 、 K_{EKG} 的平均值。未介绍的参数可参考 GXAJ 模型^[27,30,32]。

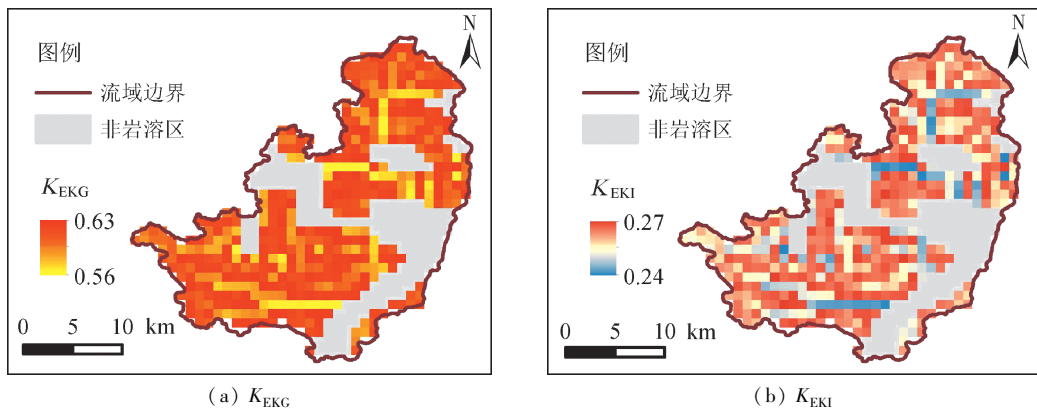


图7 表层岩溶带自由水蓄水库参数空间分布

Fig.7 Spatial distributions of parameters for freewater reservoirs of epikarst

渗透性。有研究表明,表层岩溶带中垂向裂隙的裂隙率一般高于水平向裂隙的裂隙率^[2],即垂向透水性高于侧向透水性, K_{EKG} 整体数值高于 K_{EKI} 符合这一研究规律。

根据图5(a),流域内除一般的岩溶发育区外,还存在岩溶洞穴区域。基于式(4),通过 C_{KG1} 和 C_{KG2} 两个岩溶区地下水消退系数分别反映岩溶发育区和岩溶洞穴区域对地下水的调蓄作用。岩溶洞穴退水能力较强,地下水平均汇集时间短,地下水消退系数较小,最终率定的岩溶地下水消退系数 C_{KG2} 小于 C_{KG1} 。非岩溶区域的地下水消退系数为 C_{G} 。

3.3 模拟流量径流成分分析

图8为GKDHM模型和GXAJ模型对两场典型洪水的模拟结果,由图8(b)(d)可以看出,GXAJ模型模拟流量的径流成分以地表径流和壤中流为主,地下径流在整个洪水过程中所占比例很小,且退水缓慢。本流域有大范围岩溶发育并且石漠化范围较大,流域的径流成分中地下径流应该占据一定的比重,且退水较快,因此GXAJ模型径流成分模拟结果并不理想。由于引入格林-安普特下渗过程和表层岩溶带自由水蓄水库调蓄过程,图8(a)(c)显示,GKDHM模型模拟径流成分以地表径流和地下径流

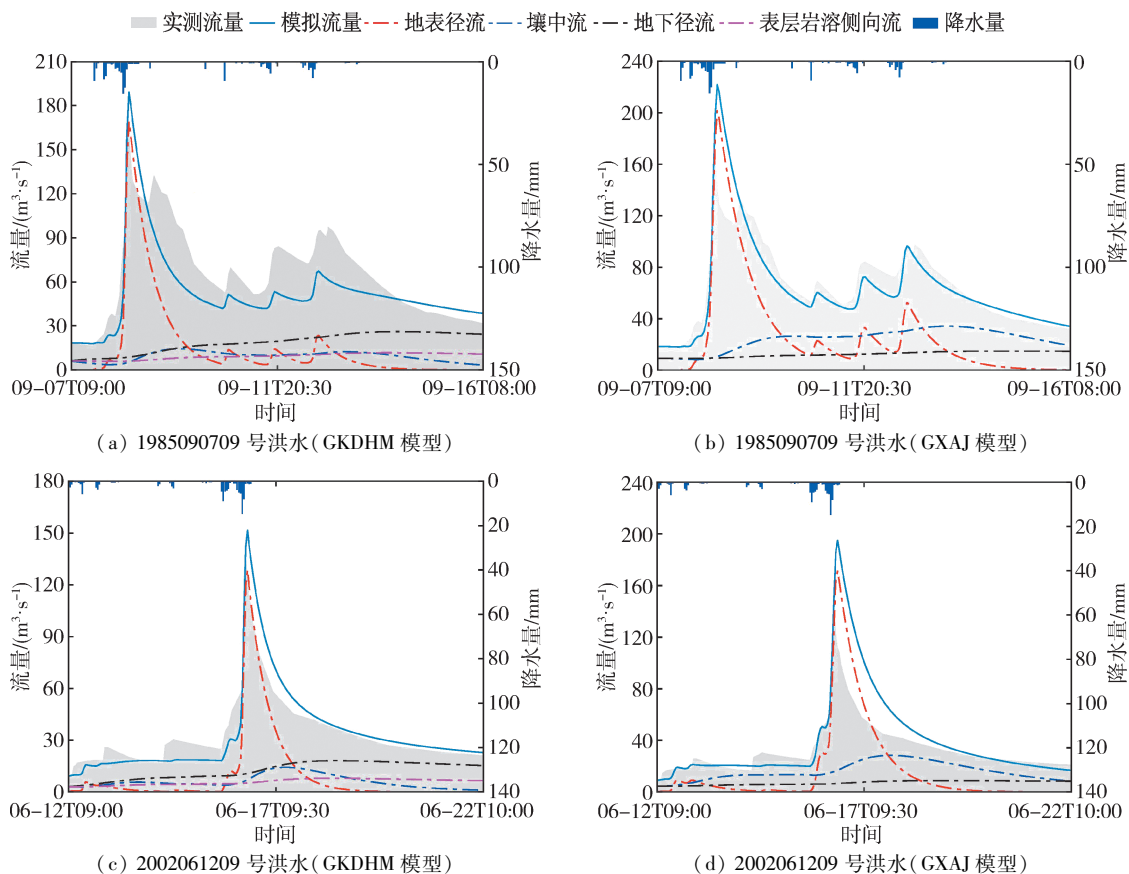


图8 洪水流量过程与径流成分

Fig.8 Observed and simulated hydrographs and associated runoff components

为主,壤中流较少,因此 GKDHM 模型可以更好地刻画岩溶流域土壤发育差、壤中流较少、地下径流比例大和地下径流退水快的特点。

4 结 语

a. 模拟精度方面,GKDHM 模型降低了径流深误差和洪峰误差,在径流深、流量过程方面的模拟精度较 GXAJ 模型有较大提高,洪峰流量模拟精度有一定的提升。GKDHM 模型可以更好地反映岩溶流域表层岩溶带以及深层地下溶隙的发育对于产汇流的影响,有效地提高了洪水模拟的精度。

b. 模型结构和参数方面,GKDHM 模型通过构建表层岩溶带自由水蓄水库和深层地下溶隙线性水库,使模型参数的空间分布更能反映流域岩溶发育特性,模拟径流成分更加符合岩溶流域水文特征。

c. 实际应用方面,本文提出的岩溶流域降水径流模拟方法有效提高了普厅河流域洪水模拟精度,可为受表层岩溶带以及深层地下溶隙影响的洪水预报提供方法与技术支撑,在我国西南中小河流岩溶流域有较大的推广应用价值。

参考文献:

[1] ZHANG Z, XI C, GHADOUANI A, et al. Modelling hydrological processes influenced by soil, rock and vegetation in a small karst basin of Southwest China[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(15): 2456-2470.

[2] 陈喜,张志才,容丽,等. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应[M]. 北京:科学出版社,2014.

[3] 许波刘,董增川,洪娴. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 37-42. (XU Boliu, DONG Zengchuan, HONG Xian. Lumped karst hydrological model and its application [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 37-42. (in Chinese))

[4] ZHOU Q, CHEN L, SINGH V P, et al. Rainfall-runoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 524-533.

[5] JEANNIN P Y. Modeling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Hölloch Cave (Muotatal, Switzerland) [J]. Water Resources Research, 2001, 37(2): 191-200.

[6] 张志才,陈喜,石朋,等. 喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 806-811. (ZHANG Zhicai, CHEN Xi, SHI Peng, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in karst watershed [J]. Advances in Water Sciences, 2009, 20(6): 806-811. (in Chinese))

[7] 张珂,吴南,徐国鑫,等. GF-1 遥感影像结合等高线消除云层干扰的连续水体重建法[J]. 河海大学学报(自

然科学版), 2021, 49(4): 295-302. (ZHANG Ke, WU Nan, XU Guoxin, et al. An extraction method for continuous water body through cloud interference removal using GF-1 remote sensing and DEM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4): 295-302. (in Chinese))

[8] 范亚洲,张珂,刘林鑫,等. 水库水体的最大类间方差迭代遥感提取方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 50-55. (FAN Yazhou, ZHANG Ke, LIU Linxin, et al. Optimal extraction of reservoir water body from remote sensing images based on iterative inter-class variance maximization method[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 50-55. (in Chinese))

[9] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 680-693. (LUO Xuling, WANG Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in southwest karst area [J] Acta Ecologica, 2021, 41(2): 680-693. (in Chinese))

[10] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))

[11] 刘堃,何祺胜,荆琛琳,等. 基于机器学习的蒸散量插补方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 109-115. (LIU Kun, HE Qisheng, JING Chenlin, et al. Gap filling method for evapotranspiration based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 109-115. (in Chinese))

[12] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 13-18. (in Chinese))

[13] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and earlywarning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese))

[14] 梁桂星,覃小群,崔亚莉,等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60-67. (LIANG Guixing, QIN Xiaoqun, CUI Yali, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 60-67. (in Chinese))

- [15] 陈石磊,熊立华,查悉妮,等. 考虑喀斯特地貌的分布式降雨径流模型在西江流域的应用[J]. 人民珠江,2020,41(5):17-24. (CHEN Shilei, XIONG Lihua, ZHA Xini, et al. Application of a DEM-based distributed rainfall-runoff model considering karst landform in the Xijiang River Basin [J]. Pearl River, 2020, 41(5):17-24. (in Chinese))
- [16] 薛冰贤,陈喜,陈曦,等. 考虑山坡和洼地水力联系的半分布式喀斯特水文模型:以陈旗流域为例[J]. 中国农村水利水电,2019(3):88-92. (XUE Bingxian, CHEN Xi, CHEN Xi, et al. A semi-distributed karst hydrological model considering the hydraulic connection between hillslope and depression: a case study in Chenqi Catchment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3):88-92. (in Chinese))
- [17] 李静,焦树林,梁虹,等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究:以红水河系六洞河流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(4):388-394. (LI Jing, JIAO Shulin, LIANG Hong, et al. Research on the impact on runoff by time-scale of the precipitation in karst basin in view of MIKE SHE model: a case in Liudong River of the Hongshuihe System [J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4):388-394. (in Chinese))
- [18] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on grid-Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1):19-25. (in Chinese))
- [19] 张志才. 西南喀斯特流域分布式水文模型及其应用[D]. 南京:河海大学,2009.
- [20] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [21] 陈晓宏,颜依寒,李诚,等. 溶蚀丘陵型岩溶流域概念性水文模型及其应用[J]. 水科学进展,2020,31(1):3-11. (CHEN Xiaohong, YAN Yihan, LI Cheng, et al. Conceptual hydrological model of corrosional hill karst watershed and its application [J]. Advances in Water Sciences, 2020, 31(1):3-11. (in Chinese))
- [22] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5):385-391. (in Chinese))
- [23] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke, ZHANG Qinnuo, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):94-101. (in Chinese))
- [24] MANGIN A. Contribution a l'etude hydrodynamique des aquiferes karstiques [J]. Annales de Speleologie, 1974, 29:283-332.
- [25] 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]. 中国岩溶,2005,24(3):250-254. (QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng. A review on recent advances and perspective in epikarst water study [J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(3):250-254. (in Chinese))
- [26] 周宁,刘波. 鄂西南岩溶地区表层岩溶带发育强度变化规律研究[J]. 中国岩溶,2009,28(1):1-6. (ZHOU Ning, LIU Bo. Varying regulation of epikarst developing intensity in southwest Hubei karst area [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1):1-6. (in Chinese))
- [27] 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(1):41-45. (KONG Fanzhe, RUI Xiaofang. Calculation method for the topographic index in TOPMODEL [J]. Advances in Water Sciences, 2003, 14(1):41-45. (in Chinese))
- [28] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学,2007.
- [29] 梁虹. 喀斯特流域地貌产流机制与产流特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),1995,14(2):23-28. (LIANG Hong. Geomorphological runoff yield mechanism and characteristics of karst drainage basin [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science), 1995, 14(2):23-28. (in Chinese))
- [30] 尚晓三,王栋. 两种不同类型的水文模型在贵州典型岩溶地区的应用[J]. 南京大学学报(自然科学版),2009,45(3):409-415. (SHANG Xiaosan, WANG Dong. Application of two different hydrological models in the typical [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2009, 45(3):409-415. (in Chinese))
- [31] 张健云,庄一鹤. 岩溶地区流域水文模型的探讨及应用[J]. 河海大学学报,1988,16(3):74-85. (ZHANG Jianyun, ZHUANG Yiling. Study and application of hydrological model for karst catchments [J]. Journal of Hohai University, 1988, 16(3):74-85. (in Chinese))
- [32] YAO C, LI Z J, BAO H J, et al. Application of a developed Grid-Xin'anjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9):923-934.
- [33] HUNTOON P W. Hydrogeologie characteristics and deforestation of the stone forest karst aquifers of South China [J]. Ground Water, 1993, 30(2):167-176.
- [34] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1):42-47. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-03 编辑:熊水斌)