

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190110

TOPMODEL 模型在径流模拟中的改进与应用

李钰珩¹, 熊立华², 唐莉华¹

(1.清华大学 水利水电工程系,北京 100084;2.武汉大学 水利水电学院,湖北 武汉 430072)

摘要:合理的导水率假设关系对于提高 TOPMODEL 模型在流域径流模拟中的精度具有重要意义。以旬河流域为例,基于中国土壤水力参数集确定了流域导水率关系,将原 TOPMODEL 模型的指数型导水率关系修改为抛物线型,并通过引入植被冠层覆盖参数来改进 TOPMODEL 降雨模块。研究表明,选取适用于研究流域的导水率假设关系,可有效地提高 TOPMODEL 模型的模拟精度。同时,对于以林草地为主要土地利用类型的流域,考虑植被冠层截留的影响可有效改善模型模拟效果。

关键词:TOPMODEL 模型;导水率假设;降雨截留;旬河流域

中图分类号:P334.92

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2020)04-0033-07

TOPMODEL (Topography-based hydrological model) 模型是 1979 年由 Beven 和 Kirkby^[1]提出的一种利用地形指数来反映水文过程相似性的半分布式流域水文模型。该模型具备分布式水文模型良好的物理基础以及集总式水文模型的计算简便和优化参数少的优点,主要适用于湿润地区。

该模型最初由 Beven 等人提出并验证^[2],随后,大量研究从数字流域信息提取方法,模型相关假设^[3]、模型参数率定方法^[4]和参数的不确定性分析等多方面对模型进行改进。目前, TOPMODEL 已成功运用到构建洪水预报系统和无资料流域地区的径流模拟等研究领域。在我国,该模型最初由郭方^[5]等和熊立华^[6]等在湿润流域应用,并与新安江模型进行了对比;随后宫兴龙^[7]等通过改进使其可应用于半干旱地区。

大量关于土壤表层导水率的研究发现,并非所有流域的土壤导水率随土壤深度的变化关系都符合模型最初所采用的指数递减的导水率假设关系。其中, Ambrose^[8]基于温带海洋性气候的 Ringelbach 流域基流实测数据,发现该流域的导水率关系符合抛物线型关系,随后便提出了幂函数关系下的导水率假设; Wang^[9]等基于美国温带湿润气候区的纽约州 Ward Pound Ridge 流域实测数据发现该流域导水率假设符合幂函数关系

假设,并推导了相应幂函数关系假设下的 Green-Ampt 超渗产流方程。因此, TOPMODEL 模型的导水率假设关系是否适用于所选取的研究流域对于提高模型模拟精度具有重要意义。本文以旬河流域为例,讨论 TOPMODEL 模型的导水率假设对于模拟结果的影响;并在此基础上,改进降雨模块,期望获得更高精度的模拟结果。

1 模型和方法

1.1 TOPMODEL 原理^[9]

在 TOPMODEL 模型中,主要存在以下两个假设^[9]:

假设一:该点的饱和壤中流保持稳定的状态,包括流域产流速率 R 保持稳定以及地下水水力坡度近似等于地表局部坡度 $\tan B_x$,故连续性方程如下:

$$A_x R = T_x \tan B_x C_x \quad (1)$$

式中: A_x (m^2)为该点的集水面积; R (m/t)为流域平均产流速率; T_x (m^2/t)为该点的导水率; $\tan B_x$ 为该点的地表坡度; C_x (m)为该点地下水流动对应的等高线宽度。

假设二:导水率是地下水水面深度的负指数函数

$$K(z) = K_0 e^{-fz} \quad (2)$$

式中: K_0 (m/t)为该点的土壤表层渗透系数; f 为控制函数下降速率的参数。

收稿日期:2019-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41890822)

作者简介:李钰珩(1997-),女,广东江门人,硕士研究生,主要从事水文水资源工作。E-mail: yuhang-118@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:熊立华(1972-),男,湖北荆门人,教授,博导,主要从事水文水资源研究。E-mail: xiongh@whu.edu.cn

对式(2)从 z_{wt} (地下水水面深度) 到 z_0 (土壤总深度) 进行积分, 由于 f 和 z_0 的值足够大, 故 e^{-fz_0} 可作为省略项, 可推导得:

$$T_x = \int_{z_{wt}}^{z_0} K_0 e^{-fz} = T_0 (e^{-fz_{wt}}) \quad (3)$$

式中: $T_0 = \frac{K_0}{f}$ 为流域的饱和导水率, 且认为全流域饱和导水率分布均匀。

其中, 饱和缺水深度 S 和地下水水面深度 z_{wt} 的转换关系如下:

$$z_{wt} = \frac{S}{n_{drain}} \quad (4)$$

故联立式(3)、(4), 假设二通常也表述为土壤导水率与缺水深度呈指数递减关系, 即:

$$T_z = T_0 \exp\left(-\frac{S}{m}\right) \quad (5)$$

式中: 比例参数 $m = n_{drain} / f$; n_{drain} 为土壤孔隙比。

基于上述两个假设, 模型在进行计算时, 流域将被划分为若干个单元网格, 而每一个网格处的土壤可相应划分为三个含水区, 分别为植被根系区 S_r 、土壤非饱和区 S_u 和饱和地下水区 (饱和缺水深度 S_i), 其示意图见图 1。每个网格内的水文进程如下: 降水首先进入植被根系区, 部分水分储存在该区域并参与蒸发, 蒸发量可用 E_a 表示, 而其余的直接渗透到土壤非饱和区。其中, 若降雨速率大于渗透速率 r 时, 土壤表层便会超渗产流, 用 fex 表示; 接着, 在土壤非饱和区的水分一部分以速率 q_v 垂直进入地下水区。其中, 若地下水水面抬升并于某一低洼汇合处冒出则生成回归流 ex ; 最后在

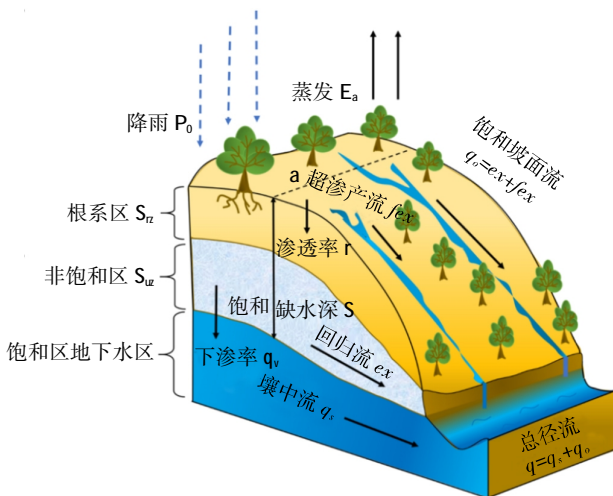


图 1 TOPMODEL 模型物理概念示意图

Fig.1 The schematic diagram of TOPMODEL physical concept

地下水区, 地下水通过侧向运动形成饱和壤中流 q_s 。因此, 在 TOPMODEL 中, 饱和壤中流和饱和坡面流组成流域总径流 q_t , 饱和坡面流 q_0 又由超渗产流和回归流组成, 故表达式为:

$$q_t = q_s + q_0 = q_s + fex + ex \quad (6)$$

1.2 导水率假设的改进

TOPMODEL 模型原先假设导水率随着土壤深度的增加呈指数递减关系, 可后续研究发现并非所有流域的导水率关系都符合该假设, 而这也是导致 TOPMODEL 模型在某些流域模拟结果出现较大偏差的重要原因。针对该问题, Ambroise^[3]等基于流域实测数据对模型的导水率假设提出了修改, 指出模型导水率关系除了已知的指数型关系外, 还存在有抛物线型关系以及线性关系, 但其研究中所使用的模型并未考虑土壤入渗模块。本文根据三种不同形式的导水率假设关系, 即在模型假设一不变的情况下, 相应地修改假设二中导水率与饱和缺水深度的关系式, 再通过联立式(1)和式(5), 逐步推导得到指数型、抛物线型以及线性导水率假设关系下的所对应的地形指数、饱和壤中流以及土壤入渗方程的表达式 (见表 1)。

1.3 参数率定

本文采用的参数优化方法为基于孤立物种的粒子群优化算法 (ISPSO)^[4], 即一种在目标函数上寻找多个局部最优解的多模态优化算法。该算法可使孤立粒子结合生成孤立物种, 从而缩小原先粒子群优化算法 (SPSO) 的种群大小。目前, 该算法已成功应用于随机降雨生成、风暴跟踪和气候变化等研究中。TOPMODEL 模型参数总共包含以下 10 个参数, 如表 2 所示。

本文主要采用纳什效率系数 NSE 作为功能函数来评价 TOPMODEL 的模型精度, 其表达式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (7)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 为 i 时段的实测流量值; $Q_{s,i}$ 为 i 时段的模拟流量值; $\overline{Q_{obs}}$ 为实测流量均值; N 为时段总数。NSE 越接近 1, 则模型模拟效果越好。

2 研究区域

2.1 流域概况

本文所选取的研究区域为旬河流域。旬河发源于秦岭中段段沙沟岭南麓, 向东南流经旬阳县注入汉江, 全长共计 218 km, 流域面积约 6 300 km²。旬河流域 (108°40'~109°44' E, 32°82'~33°92' N) 多山地, 海拔高

表1 不同导水率假设下模型主要方程式

Table1 The TOPMODEL equations under different types of hydraulic conductivity assumption

	指数形式	抛物线形式	线性形式
导水率剖面图 ^①			
导水率函数 T_z	$T_z = T_0 \exp(-S/m)$	$T_z = T_0 (1-S/m)^2$	$T_z = T_0 (1-S/m)$
地形指数 λ	$\lambda = \ln(a/\tan\beta)$	$\lambda = \sqrt{a/\tan\beta}$	$\lambda = a/\tan\beta$
饱和壤中流 q_s	$q_s = T_0 e^{-\lambda} e^{-\frac{S}{m}}$	$q_s = T_0 \lambda^{-2} (1 - \frac{S}{m})^2$	$q_s = T_0 \lambda^{-1} (1 - \frac{S}{m})$
Green-Ampt 土壤入渗方程中渗透速率 r	$r = \frac{dl}{dt} = \frac{-\frac{K_0}{m}(C+I_p)}{1-e^{-\frac{I_p}{m}}}$	$r = \frac{dl}{dt} = \frac{K_0}{I_p}(C+I_p)(1-\frac{I_p}{m})$	$r = \frac{dl}{dt} = \frac{-\frac{K_0}{m}(C+I_p)}{\ln(1-\frac{I_p}{m})}$

注:在渗透速率 r 的计算式中,储吸系数 $C=\Delta\theta \cdot \Delta\psi$ ($\Delta\theta=\theta_s-\theta_i$)其中, $\Delta\theta$ 为土壤达饱和的含水量变化值,即由饱和含水量减去初始含水量可得, $\Delta\psi$ 为毛细管吸力; I_p 为截至 t_p 之前累积渗透量。

表2 TOPMODEL 模型参数

Table2 The parameters of TOPMODEL

类型	参数	单位	意义
蒸发参数	S_{max}	m	根系区最大缺水深
	t_d	H	重力排水时间滞时参数
渗透参数	K_0	m/h	土壤表层渗透系数
	$\Delta\psi$	m	湿润层毛细管吸力
	$\Delta\theta$	m	湿润层含水量变化
产流参数	$\ln(T_0)$	$m^2 \cdot h^{-1}$	土壤刚达到饱和时导水率自然对数
	S_0		根系区初始缺水深
汇流参数	R_v	m/h	线性河网汇流有效速度
	CH_v	m/h	主河道汇流有效速度
植物冠层覆盖系数	c		流域降雨被植物冠层截留的比例

度从 250 m 变化到近 3000 m。其位于北亚热带温暖湿润气候区北缘,表现为雨热同期,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温在 7.8℃~15.4℃ 之间,年平均极端最高气温 27.7℃,极端最低气温 3.1℃,年平均降水量约为 777.1~933.4 mm 之间。其地表覆被主要有阔叶林、针叶林、草甸和耕地等类型^⑩。

本文截取以向家坪水文站为出口的流域进行研究(见图 2),故流域出口断面流量采用向家坪水文站日

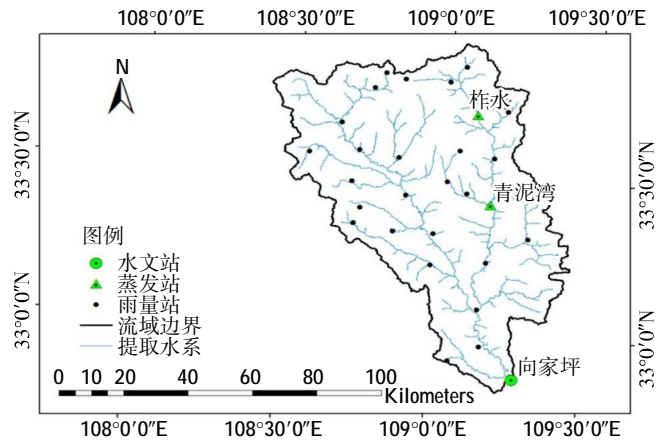


图 2 旬河流域水系及站点

Fig.2 The distribution of the Xunhe River basin and hydrological stations

流量数据,研究时段为 1991~2001 年。平均雨量基于旬河流域的 28 个雨量站点的日降雨量数据,通过泰森多边形划分求得,而日蒸发量基于柞水站和青泥湾站 2 个蒸发站点的实测数据求得。

本文从 SRTM 数据系统 (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) 下载精度约为 90m 的流域 DEM 图,并基于 ArcGIS10.2 以及 Tau DEM 地形分析工具箱,采用多流向法处理得旬河流域的地形指数

$\ln \frac{a}{\tan B}$ 空间分布图(见图 3)。

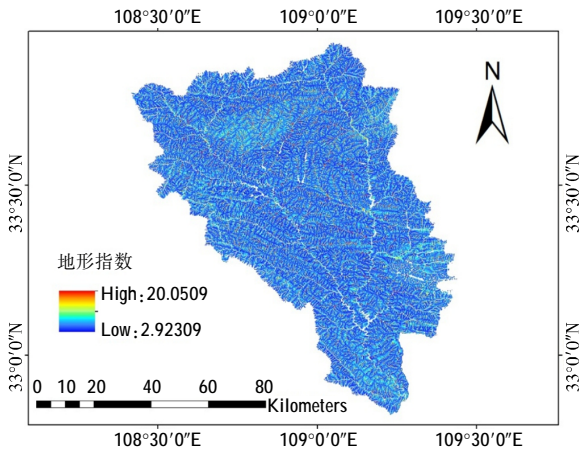


图 3 旬河流域地形指数分布

Fig.3 The distribution of the topographic indexes in the Xunhe River basin

2.2 土壤数据 $K_s \sim Z$ 拟合

由于缺少旬河流域相关的实测土壤数据,从中国土壤水力参数集 (<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soil3>) 获取相关的土壤数据。采用了参数集中由 Van Genuchten-Mualem 函数得到的饱和导水率 K_s 进行计算。该参数集含有 7 个土层(0~0.045、0.045~0.091、0.091~0.166、0.166~0.289、0.289~0.493、0.493~0.829、0.829~1.383 m),由于第 7 层土层缺失的数据较多,故只取前 6 个土层的数据资料。通过重采样,计算得 1~6 土层的空间平均饱和导水率 K_s ,如表 3 所示。

表3 旬河流域各土层的空间平均饱和导水率

Table3 The spatial mean saturated hydraulic conductivity of each layer in the Xunhe River basin

土层编号	土层深度/m	饱和导水率 K_s / $m \cdot h^{-1}$
Layer1	0.02250	0.01274
Layer2	0.06800	0.01285
Layer3	0.12850	0.01260
Layer4	0.22750	0.01251
Layer5	0.39100	0.01057
Layer6	0.66100	0.00813

表4 不同导水率假设下模型参数及模拟结果

Table4 The TOPMODEL parameters and simulation results under different types of hydraulic conductivity assumption

导水率假设	$\ln T_0$ / $m^2 \cdot h^{-1}$	m /m	Sr_0 /m	Sr_{max} /m	Rv / $m \cdot h^{-1}$	K_0 / $m \cdot h^{-1}$	$\Delta t/\theta$ /m	$\Delta \theta$	NSE		
									率定期	验证期	平均
指数型	0.7416	0.0299	0.0087	0.0198	12 639.81	0.6114	0.6281	0.7577	0.852	0.687	0.769
抛物线型	1.7953	0.1254	0.0077	0.0624	15 818.44	0.3086	0.5070	0.8762	0.876	0.756	0.816

注:重力滞时系数按经验取值 $t_0=1h/m$;且由于该模型没有划分子流域,故消除了参数 CHv 。

对上述数据进行拟合,得旬河流域导水率假设关系拟合结果如图 4 所示。可以看出,抛物线型关系($n=2$)拟合时 $R^2=0.9955$,最为接近由参数集计算得到结果。因此,可推断旬河流域导水率随土壤深度变化的关系式更加接近抛物线型假设关系。

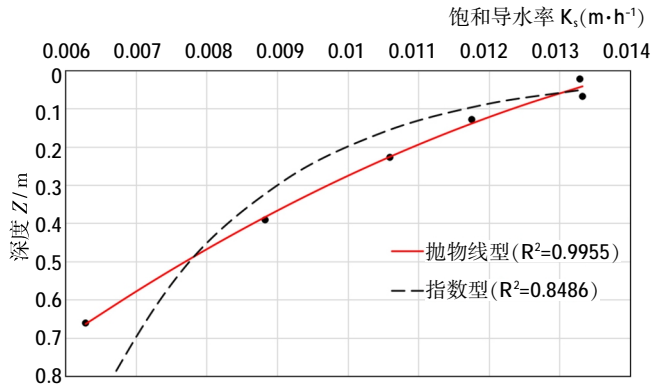


图 4 旬河流域各土层的空间平均饱和导水率拟合曲线

Fig.4 The spatial mean saturated hydraulic conductivity fitting curve of each layer in the Xunhe River basin

3 结果与分析

3.1 导水率假设比较

由 2.3 节的导水率假设关系拟合结果可知,旬河流域的导水率关系更加接近抛物线型假设,而非原 TOPMODEL 模型中的指数型导水率假设。为进一步验证该结论,本文以 1991~1997 年为率定期,1998~2001 年为验证期,分别构建指数型导水率假设以及抛物线型导水率假设下的 TOPMODEL 模型,采用纳什效率系数 NSE 评价模型精度,在旬河流域进行日径流模拟。

其中,2 种不同假设下的参数优化取值以及对应的纳什效率系数如表 4 所示。

就 NSE 在率定期和验证期的平均值而言,抛物线型假设下的 NSE 系数最高,达到 0.82,而指数型假设下的 NSE 仅达 0.77;就洪峰模拟效果而言,提取 1991~2001 年间 3 场洪峰流量大于 2 000 m^3/s 的洪水(洪水编号:19940721、19941005、19980804),对其洪峰

径流深进行分析(见表5)。其中,抛物线型导水率假设下的 TOPMODEL 径流深误差为 6.37%, 而指数型导水率假设下模型径流深误差为 18.35%, 为抛物线型导水率假设下模型结果的 3 倍, 且洪峰误差主要呈现偏大的趋势, 如 19941005 场次径流深误差达 28.85%, 已绘制 19941005 场次洪水所在期间的日径流过程线(见图5), 可见指数型导水率假设下模型模拟的洪峰远偏离实测洪峰, 而抛物线型导水率假设下的模型模拟洪峰和实测洪峰较为相近。因此, 修改模型导水率假设后, 抛物线型导水率假设下的 TOPMODEL 与原先的指数型导水率假设下的 TOPMODEL 模型相比, 其模拟精度有较为明显的提高。

表5 不同导水率假设下TOPMODEL模型洪峰模拟结果比较
Table5 The flood peak simulation comparison of TOPMODEL under different types of hydraulic conductivity assumption

假设类型	洪水场次	实测洪峰	模拟洪峰	径流深误差/%	平均标准误差/%
指数型	19940721	3120	2724.62	-12.67	18.35
	19941005	2920	3762.31	28.85	
	19980804	2230	2324.36	4.23	
抛物线型	19940721	3120	2804.11	-10.12	6.37
	19941005	2920	3038.99	4.07	
	19980804	2230	2193.70	-1.63	

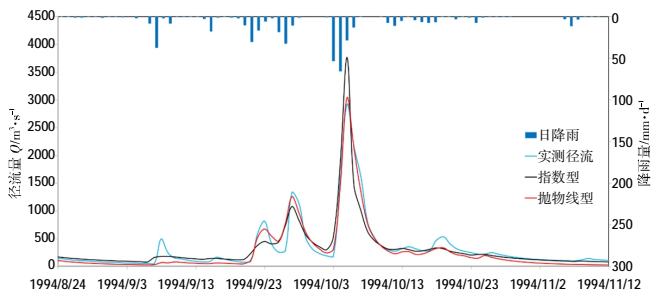


图5 不同假设下 TOPMODEL 日径流模拟结果(19941005 场次洪水)
Fig.5 The daily runoff simulation results of TOPMODEL under different types of hydraulic conductivity assumption (Flood code:19941005)

上述结果进一步说明了相比于指数型导水率假设, 旬河流域的导水率随土壤深度的变化关系更加符合抛物线型假设, 该结论与 2.2 节拟合结果一致。因此, 合理地选择流域的导水率假设, 将在一定程度上提高 TOPMODEL 模型模拟精度, 能更为真实地模拟出径流变化过程。

3.2 降雨模块改进

在 TOPMODEL 模型的降雨模块中, 模型净雨量为由雨量站计算得到的平均面雨量, 可在实际水文过程中, 部分降雨在下落时会被植物冠层截留并蒸发掉, 而未能到达地表进而参与产汇流过程。旬河流域的土地利用类型以林地(46%)、草地(34%)、耕地(17%)为主^[1], 故植物冠层截留的影响不应被忽略。因此, 为进一步改进 TOPMODEL 模型, 本文在 3.1 节的抛物线型以及指数型导水率假设下的 TOPMODEL 模型上, 参考 UFORE-Hydro 降雨模块^[2], 引入植物冠层覆盖系数 c 计算落地雨量, 即流域落地雨量:

$$P_f = P(1 - c) \quad (8)$$

在其降雨模块中, 参数 $c = 1 - e^{-k \cdot LAI}$, 相比经验系数 k 和 LAI 值计算得到参数 c, 本文做出了相应的简化, 即直接通过率定算法确定该参数。同样地, 取 1991~1997 年为率定期, 1998~2001 年为验证期, 采用纳什效率系数 NSE 来评价 TOPMODEL 的模型精度。在率定期和验证期中, 不同假设下的参数优化取值如表 6 所示。

可见, 引入植物冠层覆盖系数 c 后, 两个模型的模拟精度都有较大提高, 指数型导水率假设下的模型平均 NSE 增加了约 0.04, 而抛物线型导水率假设下的模型平均 NSE 增加了约 0.03。其中, 率定期的 NSE 系数都增加约 0.02, 而在验证期, 指数型模型 NSE 提高约 0.04, 抛物线型模型提高了约 0.07, 故在旬河流域考虑植被覆盖影响可有效提高模型精度。为进一步分析其改进效果, 本文将 1991~2001 年流量数据进行按大到小进行排序, 其中取流量序列的前 10% 为高流量序列, 取流量序列的后 40% 为低流量序列, 其余为中流

表6 改进后不同导水率假设下TOPMODEL模型模拟结果比较

Table6 The simulation results of the improved TOPMODEL under different types of hydraulic conductivity assumption

导水率假设	lnT ₀ /m ² ·h ⁻¹	m	Sr ₀ /m	Sr _{max} /m	Rv /m·h ⁻¹	K ₀ /m·h ⁻¹	Δψ /m	Δθ	c	NSE					
										率定期		验证期		平均	
										改进	未改进	改进	未改进	改进	未改进
指数型	0.8936	0.0246	0.0275	0.0081	11 329.63	0.8158	0.1945	0.2753	0.1586	0.868	0.852	0.722	0.687	0.795	0.769
抛物线型	1.8691	0.1086	0.0025	0.0350	15 164.05	0.8832	0.3238	0.6926	0.1310	0.893	0.876	0.827	0.756	0.860	0.816

注: 重力滞时系数按经验取值 t₀ = 1h/m; 且由于该模型没有划分子流域, 故消除了参数 CHv。

量序列,并绘制旬河流域 1991~2001 年的流量组成比例图如图 6 所示,可见旬河流域以中高流量为主(超过 90%)。针对不同流量等级分别对改进前后的两个模型进行比较,其结果见表 7。

可以看出,两个模型改进后在中高流量序列的模拟精度都有所提高,且中流量序列的精度提高幅度较大,而低流量序列本身模拟精度较差,两者结果均无明显改善。由于在验证期时,约 70%的流量都属于中高流量序列,且中流量序列占 60%,而率定期只有约 55%为中高流量系列,故相比之下,验证期的改进效果比率定期更为明显。

此外,采用抛物线型导水率假设的 TOPMODEL 模型在高流量序列的模拟精度提高幅度较大,而采用指数型导水率假设的模型在中流量模拟精度上提高幅度较大。由于纳什效率系数 NSE 是以模拟值和实测值的平方值进行计算的,故当高流量序列模拟越好,整体 NSE 提高越多,故抛物线型导水率假设下的 TOPMODEL 模型改进效果更优。

上述结果进一步说明, TOPMODEL 模型的导水率假设是否与流域实际导水率关系相符合将对模拟结果造成较大的影响;同时,当流域土地利用类型主要以林地和草地为主时,考虑植被冠层截留的影响,可有效地改善 TOPMODEL 模型的模拟效果。

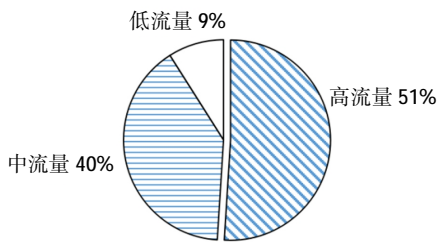


图 6 旬河流域 1991~2001 年不同等级流量组成比例

Fig.6 The composition proportion of various flow grades in the Xunhe River basin during 1991~2001

表 7 模型改进前后在不同流量等级的模拟精度比较

Table 7 The simulated precision comparison of various flow grades before and after the improved TOPMODEL

流量等级	指数型导水率假设模型 NSE		抛物线型导水率假设模型 NSE	
	未改进	已改进	未改进	已改进
高流量	0.72	0.75	0.79	0.84
中流量	-1.61	-0.99	-1.15	-0.85
低流量	-8.48	-8.35	-11.26	-11.84

4 总结

综上,本文使用 TOPMODEL 模型在旬河向家坪水文站以上流域进行了日径流过程模拟。通过对模型导水率假设以及降雨模块进行修改,对比不同 TOPMODEL 模型的模拟结果,得到如下结论:

(1)基于流域土壤导水率随深度的变化关系,本文在旬河流域的径流模拟中将原 TOPMODEL 的指数型导水率假设修改为抛物线型导水率假设。结果表明,修改后的 TOPMODEL 模拟精度得到较明显的提高,平均 NSE 系数由 0.769 提高到 0.816。因此,选取适宜的导水率随土壤深度变化的假设关系,能更好地反映流域产流特征,从而有效地提高模型模拟结果的精度。

(2)考虑到旬河流域以林草地为主要土地利用类型,植被冠层对降雨的截留影响不可忽视。本文通过引入植被冠层覆盖参数 c 来改进模型降雨模块。结果表明,该方法可有效地提高模型的模拟精度,尤其对中高流量序列的模拟精度改善效果明显。

参考文献:

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979,24(1):43-69.
- [2] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, et al. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments [J]. Journal of Hydrology, 1984,69(1):119-143.
- [3] Ambrose B, Beven K, Freer J. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrological similarity [J]. Water Resources Research, 1996,32(7):2135-2145.
- [4] CHO H, KIM D, Olivera F, et al. Enhanced speciation in particle swarm optimization for multi-modal problems [J]. European Journal of Operational Research, 2011,213(1):15-23.
- [5] 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,(3):296-301. (GUO Fang, LIU Xinren, REN Liliang. A topography based hydrological model TOPMODEL and its widened application [J]. Advances in Water Science, 2000,(3):296-301. (in Chinese))
- [6] 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,(5):5-8. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, HU Caihong. Application and studies of TOPMODEL in runoff simulation on different watersheds [J]. Journal of China Hydrology, 2002,(5):5-8. (in Chinese))
- [7] 宫兴龙,付强,王斌,等. 联合改进 TOPMODEL 和 PDSI 的半干旱区干旱评估模型构建 [J]. 农业工程学报, 2018,34(6):137-144. (GONG Xinglong, FU Qiang, WANG Bin, et al. Construction of draught

- estimation model with combination of improved TOPMODEL and PDSI [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(6):137-144. (in Chinese)
- [8] Wang J, Endreny T A, Hassett J M. Power function decay of hydraulic conductivity for a TOPMODEL-based infiltration routine [J]. Hydrological Processes, 2006,20(18):3825-3834.
- [9] 熊立华,郭生练. 分布式流域水文模型 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004. (XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed Hydrologic Model [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [10] 李泽君,刘攀,张旺,等. SWAT 模型和新安江模型在汉江旬河流域的应用比较研究 [J]. 水文水资源研究, 2014,3(4):307-314. (LI Zejun, LIU Pan, ZHANG Wang, et al. Comparative study on the performance of SWAT and Xin'anjiang models in Xunhe basin [J]. Journal of Water Resources Research, 2014,3(4):307-314. (in Chinese))
- [11] 刘移胜,熊立华. 气候与土地利用变化对旬河流域径流的影响研究 [J]. 水文水资源研究, 2013,2(4):181-187. (LIU Yisheng, XIONG Lihua. Research on streamflow responses to land use change and climate variability in Xunhe catchment [J]. Journal of Water Resources Research, 2013,2(4):181-187. (in Chinese))
- [12] Wang J, Endreny T A, Nowak D J. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008,44(1):75-85.

Application and Improvement of TOPMODEL for Runoff Modeling

LI Yuheng¹, XIONG Lihua², TANG Lihua¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Water Resource and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Appropriate hydraulic conductivity assumption is of great significance for TOPMODEL to increase its accuracy in runoff modeling. Using the China dataset of soil hydraulic parameters, this study developed the TOPMODEL with power function hydraulic conductivity assumption, instead of the original exponential function assumption, in Xunhe watershed. What is more, this study also introduced the canopy cover fraction to improve the precipitation module in TOPMODEL. The results draw the conclusion that choosing the appropriate assumption of hydraulic conductivity could make TOPMODEL simulate the runoff more accurately. Besides, it also shows that especially for the watersheds of which the main land use types are forest and grass land, considering the effect of canopy cover could improve the simulation of TOPMODEL.

Key words: TOPMODEL; hydraulic conductivity assumption; interception; Xunhe watershed

(上接第 13 页)

Simulation of Relationship between Evaporation and Meteorological Elements of Bare Ground Diving Based on Principal Component Analysis

XU Yingying¹, LI Wei², WANG Zhenlong³, LV Haishen¹, FAN Yue¹, WANG Bing³, MEI Haipeng³, WANG Yining⁴

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center),

MWR, Beijing 100053, China; 3. Water Resources Research Institute of Anhui Province, Bengbu 233000, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the diving evaporation and meteorological observation data of Wudaogou hydrological experimental station during 1993-2015, this paper analyzed the multicollinearity problem between multiple meteorological elements, used principal component analysis to solve the problem, and extracted the principal components as explanatory variables to establish diving multiple linear regression prediction model for evaporation and principal components. The results show that the tolerances of ground temperature, absolute humidity and average air temperature are all less than 0.1 while the variance expansion factors are all greater than 10, and there are obvious multicollinearities among meteorological elements. Three principal components were extracted. The first principal component mainly reflects the effects of ground temperature, absolute humidity, average temperature, water vapor pressure difference and water surface evaporation. The second principal component is closely related to relative humidity, and the third principal component is closely related to wind speed. The established multivariate regression prediction model for diving evaporation has lower data dimensions with higher accuracy, and has passed various significance tests, which could be used for actual prediction of diving evaporation.

Key words: diving evaporation; meteorological elements; multiple collinearity; principal component analysis; multiple regression