

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.005

基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型

王贵作^{1 2},任立良¹

(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. 水利部发展研究中心,北京 100038)

摘要 :根据已有产流机制的研究结果,提出了当土壤含水量大于栅格蓄水容量时会产生径流的栅格蓄水容量概念,以及通过栅格植被根系层深度和田间持水量计算流域内各点栅格蓄水容量的栅格蓄水容量计算方法,并在充分考虑流域内植被类型、土壤类型和土壤水分参数对流域蓄水容量分布影响的基础上,应用栅格垂向混合产流机制描述植被根系层的水量变化,从而避免了对复杂的土壤水运动过程的直接描述.甸子流域的应用结果表明,基于栅格垂向混合产流机制的分布式流域水文模型对多年连续序列模拟的效率系数达到 0.744,年均径流深误差为 1.18 mm,相对误差为 2.18%.此模拟结果对于寒旱区的水文过程模拟来说是可以接受的.

关键词 :栅格垂向混合产流;双源蒸散发;分布式水文模型;寒旱区

中图分类号 :P333 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)04-0386-05

在水文过程模拟研究中,新安江模型与 TOPMODEL 模型得到了广泛的应用.赵人俊^[1]认为,当包气带土壤含水量大于田间持水量时,所有降雨(减去同期的蒸散发)都将产流. Beven 等^[2-4]依据植被根系层深度提出了最大蓄水容量概念,并认为土壤含水量大于最大蓄水容量时就会产流.根据上述观点,本文首先提出了当土壤含水量大于栅格蓄水容量时将会产生径流的栅格蓄水容量概念,以及通过栅格植被根系层深度和田间持水量来计算流域内各点栅格蓄水容量的栅格蓄水容量计算方法,然后以老哈河源头甸子站以上流域为例构建了水文模型.该模型充分考虑了寒旱区的水文特性以及积雪融雪过程,采用双源蒸散发模型^[5],通过常规气象观测资料直接计算寒旱区实际蒸散发量,即模型的驱动因子,并采用栅格垂直混合产流机制模拟该流域的日时间尺度降水产流过程.

1 模型构建

基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型包括积雪融雪模块、冠层截模块、蒸散发模块、栅格垂向混合产流模块和汇流模块 5 个部分.

1.1 积雪融雪的计算

能量平衡法能够很好地描述积雪融雪过程,但求解能量平衡方程所需的参数及数据不易获取,故本文采用度日因子法^[6-7]来模拟积雪融雪过程.

1.2 冠层截留量的计算

假定降雨首先滴落在冠层上,当冠层截留量达到最大截留能力 $I_{\max}$ 时,剩余的降雨穿过植被到达地表^[8]:

$$S_{t+\Delta t} = \begin{cases} S_t + P_g F - E_1 & (S_t + P_g F \leq I_{\max}) \\ I_{\max} - E_1 & (S_t + P_g F > I_{\max}) \end{cases} \quad (1)$$

$$P = \begin{cases} P_g - P_g F & (S_t + P_g F \leq I_{\max}) \\ P_g - (I_{\max} - S_t) & (S_t + P_g F > I_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期 :2008-06-30
基金项目 :国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB400502);教育部、国家外国专家局“ 111 计划 ”(B08048);教育部科学技术研究重大项目(308012)
作者简介 :王贵作(1979 —)男,辽宁凤城人,博士研究生,主要从事水文过程模拟研究.

式中： $S_{t+\Delta t}$ 、 S_t —— $t+\Delta t$ 和 t 时刻的冠层截留量； P_g —— Δt 时段内的降水量； F ——植被地表覆盖率； E_l ——植被截留蒸发； P —— Δt 时段内的净雨量。

1.3 蒸散发计算

与湿润地区不同，干旱半干旱地区的流域蒸散发量主要是由土壤的供水能力决定的^[9]，因而不宜直接将蒸发皿观测资料或计算的蒸散发能力作为水文模型的驱动因子。本文采用 Mo 等^[5]提出的双源蒸散发模型直接计算植被、截留和土壤的实际蒸散发量，计算公式为

$$E_c = \frac{\Delta R_{nc} + \frac{\rho C_p D_0}{r_{ac}}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_{ac}} \right) \right]} (1 - W_{fr}) \tag{3}$$

$$E_i = \frac{\Delta R_{nc} + \frac{\rho C_p D_0}{r_{ac}}}{\lambda (\Delta + \gamma)} W_{fr} \tag{4}$$

$$E_s = \frac{\Delta R_{ns} - G + \frac{\rho C_p D_0}{r_{as}}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_{as}} \right) \right]} \tag{5}$$

式中： E_c ——植被实际蒸腾速率； E_i ——截流蒸发速率； E_s ——土壤实际蒸发速率； R_{nc} ——冠层获得的净辐射； R_{ns} ——土壤获得的净辐射； G ——土壤热通量； Δ ——饱和水汽压梯度； ρ ——平均空气密度； C_p ——空气质量定压热容； γ ——空气湿度常数； λ ——蒸发潜热； W_{fr} ——潮湿冠层比例； r_c ——冠层总气孔阻抗； r_s ——土壤表面阻抗； r_{ac} ——冠层总边界阻抗； r_{as} ——土壤表面与冠层源汇高度间的空气动力学阻抗； D_0 ——冠层源汇高度处的水汽压差。

1.4 栅格垂向混合产流模型

栅格蓄水容量定义为植被根系深度与田间持水量的乘积，即

$$S_c = W_M Z_r \tag{6}$$

式中： S_c ——栅格蓄水容量； W_M ——田间持水量； Z_r ——植被根系深度。

在栅格垂向混合产流模型中，净雨量 P 首先通过简化的 Green-Ampt 公式^[10-12]划分为地表径流和实际下渗量 F_A 。当净雨量大于实际下渗量时，就会产生地表径流 R_S ：

$$R_S = P - F_A \tag{7}$$

$$F_A = \begin{cases} F_M & (P \geq F_M) \\ P & (P < F_M) \end{cases} \tag{8}$$

$$F_M = F_C \left(1 + K_F \frac{S_c - S_0}{S_c} \right) \tag{9}$$

式中： F_A ——实际下渗量； F_M ——渗漏能力； F_C ——稳定入渗率； K_F ——土壤含水量对下渗率影响的灵敏系数； S_0 ——土壤含水量。

当实际下渗量与土壤含水量之和与植被蒸腾量和土壤蒸发量之差大于栅格蓄水容量时，就会产生壤中流和地下径流。壤中自由水蓄量的计算公式为

$$S_S = F_A + S_0 - E_C - E_S - S_c \quad (F_A + S_0 - E_C - E_S - S_c > 0) \tag{10}$$

式中： S_S ——自由水蓄量； E_C ——植被蒸腾量； E_S ——土壤蒸发量。

壤中流和地下径流通过壤中流出流系数和地下径流出流系数来划分：

$$R_I = K_I S_S \tag{11}$$

$$R_G = K_G S_S \tag{12}$$

式中： R_I ——壤中流； R_G ——地下径流； K_I ——壤中流出流系数； K_G ——地下径流出流系数。

1.5 汇流计算

地表径流直接汇入邻近下游河道，壤中流和地下径流分别通过线性水库汇入邻近下游河道，河道汇流计

算采用分段马斯京根法.

2 模型应用

2.1 流域概况

老哈河流域属温带半干旱大陆性季风气候区,多年平均降水量 450 mm 左右,年降水主要集中在汛期(6~9月),汛期降水占全年 80% 以上.由于受大陆季风性气候影响,该地区蒸发量较大,年平均陆地水面蒸发量为 1 600~2 500 mm.甸子站位于老哈河流域上游,地理位置为东经 118°50′,北纬 41°25′,其集水区域位于流域南端,设有 10 个雨量站和 3 个蒸发站,集水面积 1 643 km²,气温较低,多年平均降水量 520 mm 左右.

2.2 基础资料

利用 DEM 数据描述甸子站以上流域的地形分布. DEM 数据来源于美国国家地球物理数据中心的全球 1 km 基础高程资料(global land one-kilometer base elevation, GLOBE),其分辨率为 30″.甸子站以上流域栅格化后的单元格共有 56 行 81 列,将原始 DEM 进行填洼处理后,计算水流方向和集水面积,并确定流域边界.

土地覆被资料采用美国马里兰大学的全球 1 km 土地覆被资料(University of Maryland's of 1 km global land cover data, UMD). UMD 将全球划分为 14 种覆被类型,其分辨率为 1 km.各种土地覆被类型需要确定的参数有最小气孔阻抗、冠层反照率、粗糙高度、零平面位移、植被高度和最大叶面宽度等,根据陆面数据同化系统(land data assimilation system, LDAS)^[13]确定.甸子站以上流域内共有 9 种覆被类型(图 1),各覆被类型根系深度见表 1.其中,面积最大的耕地占流域面积的 31.98%,林地草原占 24.98%,草地占 20.06%,林地和常绿针叶林分别占 11.35%和 9.80%,其他 4 种覆被类型面积所占的比例小于 1%.

土壤类型资料采用国际粮农组织(FAO)土壤图,分辨率为 1 km.甸子站以上流域内共有 3 类土壤,如图 2 所示.

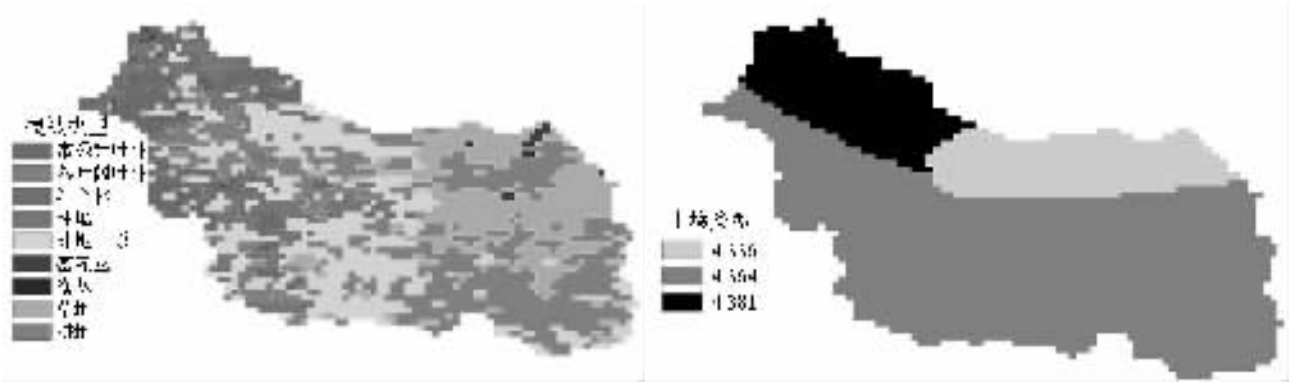


图 1 甸子站以上流域覆被类型

图 2 甸子站以上流域土壤类型

Fig. 1 Vegetation types upstream of Dianzi station

Fig. 2 Soil types upstream of Dianzi station

表 1 各土地覆被类型根系深度^[13]

Table 1 Root depths of different kinds of vegetation types^[13]

UMD 土地覆被分类	常绿针叶林	落叶阔叶林	混合林	林地	林地草原	密灌丛	灌丛	草地	耕地
根系深度/m	1.0	1.25	1.125	0.997	0.872	0.651	0.578	0.75	0.75

气象资料来自中国气象局,收集的日气象数据主要包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均风速、平均水汽压和降水量等.

2.3 模型参数率定

参数率定采用粒子群优化算法^[14],率定结果见表 2.

表 2 参数率定结果

Table 2 Calibrated results for various parameters

参数	α	F_C	K_F	K_I	K_G	C_I	C_G	蓄量常数/h	流量比重因子
率定值	6.4753	61.1224	5.0192	0.5178	0.2978	0.8097	0.9975	24	0.45

注: α 为土壤干化参数; C_I 为壤中流消退系数; C_G 为地下径流消退系数.

2.4 日流量过程模拟

日径流过程模拟结果与实测结果比较见图 3。从图 3 可以看出,模拟日径流过程与实测日径流过程吻合较好。

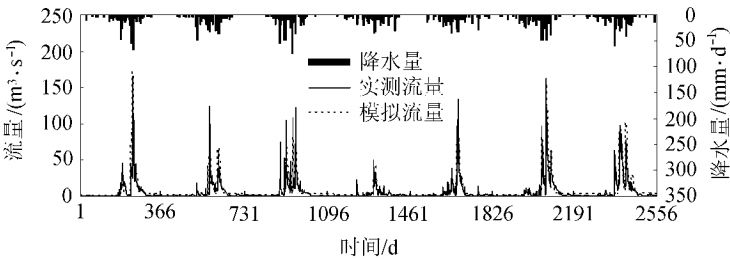


图 3 实测与模拟流量过程比较(1973~1979 年)

Fig. 3 Comparison between measured and simulated daily runoff with time (1973-1979)

模型的模拟效率及误差见表 3。由表 3 可见,在甸子站以上流域日径流过程模拟中,模型的效率系数达到 0.744,年均径流深误差为 1.18 mm,相对误差为 2.18%,日径流过程模拟取得了较高的模拟精度,验证期得到较好验证。在寒旱区水文过程模拟研究中,该模拟结果是可以接受的。

3 结 语

本文提出了栅格蓄水容量的概念及计算方法,在充分考虑流域内覆被类型、土壤类型和土壤水分参数对流域蓄水容量分布影响的基础上,应用栅格垂向混合产流机制描述植被根系层的水量变化,从而避免了对复杂的土壤水运动过程的直接描述。甸子站以上流域的应用结果表明,基于栅格垂向混合产流机制的分布式流域水文模型对多年连续序列模拟的效率系数达到 0.744,年均径流深误差为 1.18 mm,相对误差为 2.18%。此模拟结果对于寒旱区的水文过程模拟来说是可以接受的。这也表明基于栅格蓄水容量和栅格垂向混合产流机制构建分布式流域水文模型的方法是可行的。

参考文献:

[1] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984:32-47.

[2] BEVEN K. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction[J]. Hydrological Processes, 1992, 6: 279-298.

[3] BEVEN K. Distributed hydrological modeling: application of the TOPMODEL concep[M]. New York: John Wiley & Sons Limited, 1997.

[4] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Bulletin, 1979, 24: 43-69.

[5] MO Xing-guo, LIU Su-xia, LIU Zhong-hui, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285: 125-142.

[6] TAKEUCHI K, AO T, ISHIDAIRA H. Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(4): 633-646.

[7] AO T, ISHIDAIRA H, TAKEUCHI K, et al. Relating BTOPMC model parameters to physical features of MOPEX basins[J]. Journal of Hydrology, 2006, 320: 84-102.

[8] WIGMOSTA M S, VAIL L W, LETTENMAIER D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. Water Resource Research, 1994, 30(6): 1665-1679.

[9] 程根伟, 余新晓. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 143-168.

[10] 包为民, 王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文, 1997(3): 18-21.

[11] 包为民. 格林安普特下渗曲线的改进和应用[J]. 人民黄河, 1997(9): 1-3.

[12] 瞿思敏, 包为民, 张明, 等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 374-377.

[13] 袁飞. 考虑植被影响的水文过程模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

表 3 模型模拟效率及误差
Table 3 Simulation efficiency and errors
of hydrologic model

时段	年份	效率系数	绝对误差/ mm	相对误差/ %
率定期	1973	0.743 5	1.136 9	0.96
	1974	0.717 3	1.015 8	0.96
	1975	0.651 9	0.809 2	0.67
	1976	0.643 9	7.887 0	16.58
	1977	0.828 2	- 14.631 7	- 14.79
验证期	1978	0.856 1	12.686 8	8.68
	1979	0.768 0	3.821 7	2.26

[14] KENNEDY J , EBERHART R C . Particle swarm optimization[C] // Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks . Piscataway , NJ : IEEE Service Center , 1995 : 1942-1948 .

Distributed hydrological model based on grid vertically-mixed runoff generation

WANG Gui-zuo^{1,2} , REN Li-liang¹

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

2 . Development Research Center of Ministry of Water Resources , P . R . China , Beijing 100038 , China)

Abstract : According to previous research on runoff generation mechanisms , the concept of grid-based storage capacity is proposed : runoff is generated when the soil moisture is larger than the grid-based storage capacity . A method of calculating the grid-based storage capacity in a river basin , which uses the grid-based vegetation root depth and field capacity , is also put forward . After full consideration of the effects of vegetation types , soil types and soil moisture parameters on the distribution of storage capacity in the river basin upstream of the Dianzi hydrological station , the grid-based vertically-mixed runoff generation mechanism was employed to describe the change in soil water storage in the vegetation root layer so as to avoid a direct description of the complex soil water motion . The results show that the efficiency factor of the grid-based vertically-mixed runoff distributed hydrological model for simulating the perennial continuous sequences is 0.744 , the mean annual error of runoff depth is 1.18 mm , and the relative error is 2.18% . The results are reasonable and acceptable for the simulation of hydrological processes in cold and arid regions .

Key words : grid-based vertically-mixed runoff generation ; two-source evapotranspiration ; distributed hydrological model ; cold and arid region

+++++

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63 ,CN32-1117/TV ,ISSN1000-1980 ,双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考 .

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响 .刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号 .

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,每期定价 12.00 元 ,全年 6 期共 72.00 元 .欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系 .

编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号

电话(传真) :025-83786343

E-mail :xb@hhu.edu.cn

网址 :http://kkb.hhu.edu.cn/index_xb.htm