DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.16

MIKE SHE 模型在灞河径流模拟中的应用研究

田开迪1,沈冰1,贾宪2

(1. 西安理工大学 西北生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 2. 松辽水利委员会 水资源保护局, 长春 130021)

摘 要: 以灞河流域作为研究区域,依据该流域水文气象 1990 - 2010 年实测资料,采用 MIKE SHE 模型对流域径 流进行模拟研究,利用 ArcGis 等技术建立了模型数据库,对模型参数进行了率定和验证,使用多目标(均方根平方 误差、模型效率系数和决定系数)对模型适用性进行了评价。结果表明:年径流模拟效果比较好,MIKE SHE 模型在 灞河流域的适用性较好,研究所率定的参数可为进一步研究灞河流域水资源利用与管理提供依据。 关键词: MIKE SHE 模型; 径流; 年径流模拟; 灞河 文章编号: 1672-643X(2016)01-0091-05 中图分类号:P334.2 文献标识码:A

Application of MIKE SHE model in runoff simulation of Bahe river basin

TIAN Kaidi¹, SHEN Bing¹, JIA Xian²

(1. State Key Lab of Northwest Eco-hydraulic Engineering Base, Xian University of Technology, Xian 710048, China; 2. Water Resources Protection Bureau of Songliao Water resources Commission, Changchun 130021, China)

Abstract: The paper took Bahe Basin as research area and based on the actual data of the area from 1990 to 2010, and simulated runoff of the basin by MIKE SHE. It built the database of model by ArcGis technology and calibrated and validated the model parameters so as to evaluate the applicapility of the model by multi-object. The results showed that the simulation effect of annual runoff is good. The model has good adaptability in Bahe river basin. The calibrated parameters can provide reference for the further research of water resources utilization and management in the basin.

Key words: MIKE SHE model; runoff; simulation of annual runoff; Bahe river

径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及 人类活动的耦合作用,其演变过程既表现出确定性 的规律,同时也有强烈的随机性^[1]。径流变化的模 拟与分析可为农业灌溉、工业需水、水资源开发与管 理、流域水生态保育等提供重要科学依据^[2]。丹麦 水科学研究所研制的 MIKE SHE 模型以标准化网格 为输入单元,多模块耦合的方式来表达大气、地表及 地下的水文循环过程,在空间信息的分布式表达、植 被生长特征描述及径流模拟等方面都具有显著的优 势^[3]。李静等^[4]利用 MIKE SHE 模型应用于喀斯 特流域,模拟了5场典型洪水的径流过程,结果表 明,在相同的流域下垫面和模型条件下,若累计降水 时间增加,同样数量的降水产生的径流总量也会增 加,最大的流量出现时间也相对滞后。卢德宝等[5] 利用 MIKE SHE 模型模拟巴江岩溶流域水文过程, 得出降雨量为关键变量,且其空间分布的差异对模 拟结果影响较大的结论。黄粤等^[6]研究表明 MIKE SHE 模型能在水文、气象站点稀少,土壤及水文地 质数据缺乏的条件下,模拟开都河流域的日径流过 程,但精度上仍有待提高。姚建等^[7]运用 MIKE SHE 对鲅鱼圈地区地下水资源量进行了评价,并与 辽宁省第2次水资源评价成果做了对比,结果比较 理想。

本文以马渡王水文站以上的灞河流域为例,构 建该流域的 MIKE SHE 模型,通过模型的率定和验 证,评价 MIKE SHE 模型在该流域径流模拟的适用 性,对指导灞河流域水文观测和水资源的管理、开发 和利用具有重要意义。

收稿日期:2015-06-18; 修回日期:2015-08-17

基金项目:陕西省教育厅重点实验室项目(12JS068) 作者简介:田开迪(1993-),男,河南濮阳人,在读硕士研究生,研究方向:干旱水文与雨洪侵蚀。 通讯作者:沈冰(1948-),男,浙江湖州人,教授,博士生导师,主要从事旱区水文过程及水资源演变研究。

本次研究对象是灞河流域,位于陕西省境内,发 源于蓝田县灞塬乡箭峪岭南九道沟,流经清峪、流 峪、蓝桥河、倒沟峪,在蓝田县城汇入辋川河,经洩 湖、马渡王、在未央区谭家堡又纳入浐河,最后汇入 渭河,全长109 km。灞河流域的 DEM 如图 1 所示。 灞河流域面积为2581 km²,其中浐河的流域面积为 760 km²。灞河是所谓的"八水绕长安"八水之一。 灞河流域属于暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季 受蒙古高压控制,夏季受西太平洋副热带高压和河 西走廊、四川盆地热低压控制,四季冷暖干湿分 明^[8]。降水分布的变化趋势明显为北少南多,由流 域北部向南部呈增加的趋势变化,降水量主要集中 在7-10月。多年平均气温为13.1℃,多年平均降 雨量为798.4 mm。受地形状况和气象条件等因素 的影响,流域内不同区域的蒸发量差异较大,蒸发量 整体上从上游山区到下游平原逐渐增加。年蒸发量 776 mm,其中秦岭山区为830 mm 以上,横岭丘陵和 黄土台塬为710~830 mm, 川道平原区不足700 mm^[9] .

2 研究方法

MIKE SHE 是由欧洲水文模型(SHE)发展而来 的一个能够模拟陆表和地下水文循环过程的分布式 物理模型^[10]。MIKE SHE 模型可模拟水文循环所涉 及到的大部分水文过程以及各过程之间的水流交换, 并且根据数据的可得性以及研究目的可确定各模块 的复杂度或空间离散程度^[11],其中水流运动模块 (MIKE SHE WM)包括6个独立的且相互联系的基于 过程的子模块,分别为坡面漫流、蒸散发、河道与湖 泊、非饱和区和饱和区模块,每个子模块用于一个主 要的水文过程的描述,根据不同的模拟和实验要求这 些模块可以互相分离也可以综合起来应用^[12]。

2.1 模型各子模块

2.1.1 蒸散发模块 蒸散发主要包括叶面截流水的蒸发,作物的蒸腾作用以及土壤水分的蒸发,Kristensen – Jensen 为此建立了模型(1975)。模型的主要参数是 C₁,C₂,C₃,灌层截留指数 C_{int} 以及根形状系数 A_{root}。植物蒸腾量主要取决叶面积指数 LAI,根系土壤含水率 θ 和根密度,其计算公式如下:

$$E_{at} = f_1(LAI) \cdot f_2(\theta) \cdot RDF \cdot E_p$$
(1)
$$\begin{cases} f_1(LAI) = C_2 + C_1LAI \\ f_2(\theta) = 1 - \frac{(\theta_{FC} - \theta)^{\frac{c_3}{E_p}}}{(\theta_{FC} - \theta_w)} \end{cases}$$

$$E_{s} = E_{p} \cdot f_{3}(\theta) + (E_{p} - E_{at} - E_{p} \cdot f_{3}(\theta)) \cdot f_{3}(\theta) \cdot (1 - f_{1}(LAI))$$

$$(2)$$

式中: $f_1(LAI)$ 为叶面积指数的函数; $f_2(\theta)$ 为土壤含 水量函数; RDF 为根系分布函数; $f_3(\theta)$ 为土壤含水 量和 C_2 的函数^[13]; E_p 为潜在蒸散发能力; θ_{FC} 为饱 和含水率; θ_w 为凋萎含水率。

2.1.2 非饱和带(UZ) 非饱和带主要采用三种 计算方法:Richards 公式,重力流,和双层水平衡法; 其中前两种方法应用较多,而重力流一般适用于土 壤以粗砂为主的情况,因此本文采用 Richards 公式 法。Richards 公式需要的两个重要的物理关系是含 水量 – 吸力特征曲线 $\theta(\Psi)$ 和水力传导率函数 $K(\Psi)^{[14]}$ 。

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \Psi)^n\right]^m}$$
(3)

$$K(\Psi) = K_s \frac{\left\{\left[1 + \alpha \Psi\right]^n\right]^m - \left[\alpha \Psi\right]^{n-1}\right\}^2}{\left[1 + \alpha \Psi\right]^n}$$
(4)

式中: θ_r 是土壤残余含水率; θ_s 是土壤饱和含水率; K_s 是饱和导水率; Ψ 是不饱和土壤总水势,MPa; α , n,m,l为经验形状因数。

2.1.3 饱和带(SZ) 饱和带水力模型基于三维有 限差分法而建立,地下水水头的时空变化通过求解 三维地下水流的偏微分方程得到:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R \tag{5}$$

式中:h为地下水水头,m; K_{ij} 为水力传导度,m/s; S_s 为贮水系数; x_i 为空间坐标,m;R为单位面积上的流量的源汇项,m/s。

2.2 模型率定

本次模拟中,按照 Refsgaard and Storm 提出的 MIKE SHE 模型参数化原则,将 MIKE SHE 参数分 为两类:一类是由实测数据或遥感数据推算得到的, 这类数据虽然是基于对现实情况的真实描述,但也 存在一定的不确定性。在目前数据可获取程度无法 提高的前提下,不需要进行率定的数据是降水、蒸散 发、温度、土地利用、植被参数(叶面积指数 LAI、根 系分布参数)等;另一类是模型中非测量和计算得 到的参数,通常需要根据理论参考范围和经验对其 进行率定,包括河道的 Manning 糙率、河床透水系 数、植被参数、土壤与含水层参数(土壤层厚度、土 壤空隙度、土壤入渗湿润峰吸力、饱和土壤水系数、 土壤水分 – 吸力特征曲线参数、土壤水分 – 导水系 数关系参数等)^[6]。 本文选用 1991 - 2010 灞河流域年径流量进行 径流模拟,其中 1991 - 2000 年为数据校准阶段, 2001 - 2010 年为数据验证阶段,本文以均方根平方 误差 (*RMSE*),模型效率系数(*Ens*)和决定系数 (*R*²)来评价模型的模拟性能。

$$RMSE_{i} = \frac{\sqrt{\sum_{i} (obs_{i,i} - sim_{i,i})^{2}}}{n}$$
(6)

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs})^{2}}$$
(7)

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs}\right) \left(Q_{sim,i} - \overline{Q}_{sim}\right)\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs}\right)^{2} \sum_{i=1}^{n} \left(Q_{sim,i} - \overline{Q}_{sim}\right)^{2}}$$
(8)

2.3 模型搭建

模型各子模块可以单独建立,分别输入模型范围,气象数据,边界条件,地形,植被,土壤参数。由于流域面积较大,模型采用1km×1km网格。利用ArcGIS生成流域边界和水系,将 shape文件导入模型即得到模型边界范围。利用DEM生成带高程信息的 shape文件。利用泰森多边形法将12个雨量站的日尺度的降水数据和潜在蒸散发数据分区。利用1990年和2000年土地利用数据,1990年、2000年土地利用图见图2和图3,将21种土地利用类型合并为6类:草地,水体,耕地,森林,裸地和积雪。数据来源和属性见表1。



图1 灞河流域 DEM 图

3 结果与讨论

3.1 模型率定

参数率定的原则包括:模拟流量与观测流量相 关系数越大越好,模拟期平均径流量误差越小越好。 在合理的范围内选取一套最佳的参数组合,然后用 于验证阶段的降雨径流过程模拟验证。Joanna Doummar 指出饱和带的水力传导度和土壤含水量对 蒸散发影响较大,而饱和土壤含水量对非饱和带影 响较大^[14],因此模型率定过程中优先率定了这些参 数。率定结果见表2。





图 3 灞河流域 2000s 土地利用类型图

表1 数据来源和属性表

参数	来源	属性	
流域边界	由 DEM 提取得到	1 km×1 km 网格	
地形	DEM	1 km×1 km 网格	
河网水系	由 DEM 提取得到	1 km×1 km 网格	
土壤类型	陕西省土壤图	shape 文件	
植被	基于 Landsat TM 的	shape 文件	
	土地利用分类		
雨量站分布	泰森多边形法	1 km×1 km 网格	
降水	气象观测	12 站	
潜在蒸发	气象观测 + 彭曼公式	12 站	
流量	水文观测	1 站	

3.2 模型验证

模型率定结果见表 2,模型率定期马渡王站径 流量实测值与模拟值对比验证见图 4。模型验证期 马渡王站径流量实测值与模拟值对比验证见图 5。 由图4可以看出,丰水年(1996、1998)的模拟值比 实测值稍大,可能是由于模型高估了强降雨时的产 流量,且实测值与实际情况可能有一定误差。由图 5可以看出,2001-2005年模型模拟的年径流值比 实测值稍大,但相比率定期有所改善,2006-2010 年模拟值与实测值相差不大,拟合较好。由模型得 到的年径流的模型适用性评价结果见表 3。由表 3 可知,马渡王水文站年径流量率定期 Ens 为0.85, R² 为 0.91, RMSE 为 0.14; 验证期 Ens 为 0.83, R² 为 0.90, RMSE 为 0.21。通过对比率定期和验证期的径 流实测值和模拟值以及模型效率系数,决定系数等, 进而对模型模拟结果进行评价可知,模型较好的模 拟了灞河流域的年径流过程。

₩2 快主罗 <u>奴</u> 平尼田木						
模块	子模块	参数	变化范围	参数值		
		降水 P/mm				
	气象数据	潜在蒸散发 /mm				
	植被	叶面积指数(LAI)	0 ~ 7			
		根系深度 (R_p)	0.3 ~ 5			
		作物系数(Kc)	0 ~ 1			
		C_1	0.1 ~ 0.5	0.2		
		C_2	0.1 ~ 0.5	0.2		
		$C_3/(\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1})$	1 ~ 50	20		
		A_{root}	0.1 ~ 2	0. 25		
		C_{int}/mm	0.05 ~ 0.5	0.05		
14- Ta-114	土壤	水平水力传导度 K _{xx} /(m・s ⁻¹)	0.0001 ~ 0.01	0.001		
		垂直水力传导度 <i>K_{yy}/</i> (m・s ⁻¹)	0.0001 ~ 0.01	0.00002		
他们市		单位产水量 S_{yc}	0.01 ~ 0.1	0.02		
		单位储水量 S_{sm}/m^{-1}	0.00001 ~ 0.001	0.0001		
	坡面	曼宁系数 <i>m</i> /(m ^{1/3} ・s ⁻¹)	20 ~ 35	25		
坡面流		滞洪蓄水/mm	0			
		初始水深/mm	0			
		粉质黏土	0.0001 ~ 0.00000001	0. 000000005		
		黏土	0.0001 ~ 0.00000001	0. 00000001		
	饱和导	黏壤土	0.0001 ~ 0.00000001	0. 00000005		
	水率/	粉沙壤土	0.0001 ~ 0.00000001	0. 0000005		
	$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	壤土	0.0001 ~ 0.00000001	0.000002		
		砂壤土	0.0001 ~ 0.000000001	0. 00001		
非痴和带—		壤砂土	0.0001 ~ 0.000000001	0. 00005		
며 마 던 나 이 나 이	饱和 含水量	粉质黏土	0.4 ~ 0.5	0. 497		
		黏土	0.4 ~ 0.5	0. 482		
		黏壤土	0.4 ~ 0.5	0. 467		
		粉沙壤土	0.4 ~ 0.5	0. 471		
		壤土	0.4 ~ 0.5	0. 445		
		砂壤土	0.4 ~ 0.5	0. 415		
		壤砂土	0.4 ~ 0.5	0. 434		
6 (W7)/imi 3 2 2 2 4 3 2 2 4 3 2 4 5 5 4 3 2 2 4 5 5 4 3 2 2 4 5 5 4 5 5 4 5 5 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5						

表2 模型参数率定结果

₩ 2 ₩ 1 0 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000





2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010

2001

-	_
()	5
ч	•
_	~

	表3	模型评价结果	
参数		率定期	验证期
E_{ns}		0.85	0. 83
R^2		0.91	0.90
RMSE		0.14	0.21

4 结 论

本文首先利用灞河流域水文气象 1990 - 2010 年实测资料以及 1990、2000 年土地利用数据构建 MIKE SHE 模型,对模型参数进行率定,发现饱和带 的水力传导度、土壤含水量以及饱和土壤含水量为 敏感性参数,对于模拟结果影响较大。

马渡王水文站年径流量率定期 E_{ns} 为 0.85, R^2 为 0.91,RMSE为 0.14;验证期 E_{ns} 为 0.83, R^2 为 0.90,RMSE为 0.21。因此 MIKE SHE 模型对于灞河 流域年径流模拟具有较好的适用性,该模型对月径 流和日径流的模拟效果还有待进一步研究。

影响流域水文模拟准确性的因素很多,而各种 因素又存在很大的不确定性,因此下一步工作应采 用 GLUE 等不确定性分析方法对 MIKE SHE 模型进 行不确定性分析,从而为 MIKE SHE 模型应用于更 多流域奠定基础。

参考文献:

- [1] 候钦磊,白红英,任园园,等.50 年来渭河干流径流变化及 其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [2] Makkeasorn A, Chang N B, Zhou X. Short-term streamflow forecasting with global climate implications – A comparative study between genetic programming and neural network models[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3-4):336-354.

(上接第90页)

- [5] Shannon M A, Bohn P W, Menachem E, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. Nature,2008,452(7185):301-310.
- [6] Bachmann A, Beard V L, McCarty P L, et al. Comparisonof fixed film reactors with a modified sludge blanket reactor [J]. Pollution Technology Reviews, 1983, 10:384-402.
- [7] 徐金兰,王志盈,李 贺. 厌氧折流板反应器(ABR)的工 艺特征与处理性能[J]. 西安建筑科技大学学报(自然 科学版),2002,34(4):362-365+389.
- [8] 赵来利,佘宗莲,高孟春.常温下 ABR 处理低浓度废水性 能及污泥特性[J].环境工程学报,2010,4(4):761-766.
- [9] 杜接弟, 王毅力, 李炯, 等. HRT 对 ABR 处理低浓度废

- [3] 黄 粤,陈 曦,包安明,等. 干旱区资料稀缺流域日径流 过程模拟[J]. 水科学进展,2009,20(3):332-336.
- [4]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——以红水河系六硐河流域为例[J].中国岩溶, 2012,31(4):388-394.
- [5] 卢德宝,史正涛,李玉辉,等.巴江岩溶流域水文模拟研究[J].水文,2014,34(1):52-57+6.
- [6] 黄粤,陈曦,包安明,等.开都河流域山区径流模拟及降 雨输入的不确定性分析[J].冰川冻土,2010,32(3): 567-572.
- [7] 姚 建,张晓威. 运用 MIKE SHE 对鲅鱼圈地区地下水资源 量进行评价[J]. 黑龙江水利科技. 2012,40(9):8-9.
- [8] 武晟. 西安市降雨量特性分析和城市下垫面产汇流特 性实验研究[D]. 西安:安理工学,2004.
- [9] 贾 宪. 气候和土地利用变化下灞河流域径流响应研究 [D]. 西安:西安理工大学,2014.
- [10] Refsgaard J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models[J]. Journal of Hydrology, 1997, 198(1-4):69-97.
- [11] Graham D N, Butts M B. Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE watershed models [M]. Boca Ration, USA; CRC Press, 2005:245 - 272.
- [12] 黄粤,陈曦,马勇刚.塔里木河源流山区径流模拟及不确定性研究[J].中国沙漠,2010,30(5):1234-1238.
- [13] Denmark Hydrology Institute (DHI). Mike She user manual and reference guide [K]. 2007, Denmark (V1 and 2): 57-63.
- [14] Doummar J, Sauter M, Geyer T. Simulation of flow processes in a large scale karst system with an integrated catchment model (Mike She) – Identification of relevant parameters influencing spring discharge [J]. Journal of Hydrology, 2012, 426(12):112-123.

水的效果和颗粒污泥特征的影响[J].环境科学,2009, 30(7):2022-2029.

- [10] 苏鸿洋.复合式厌氧折流板反应器处理城市生活污水 试验研究[D].福州:福州大学,2003.
- [11] 黄永恒,王建龙,文湘华,等. 折流式厌氧反应器的工艺 特性及其运用[J]. 中国给水排水,1999,15(7):18-20.
- [12] 刘洪喜. 农村生活污水处理技术的探讨. 污染防治技术 [J],2009,22(3):30-31+78.
- [13] 王志强,李 黎,罗海霞,等.农村生活污水处理技术研究[J].安徽农业科学,2012,40(5):2957-2959.
- [14]梁祝,倪晋仁.农村生活污水处理技术与政策选择[J].中国地质大学学报(社会科学版),2007,7(3):18-22.