

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.001

分布式水沙物理模型 CASC2D-SED 的应用研究

李致家¹, 沈洁¹, 张鹏程², 李娟³, 姚成¹, 郭元¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 宁夏瑞沃水资源工程研究院, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 对基于栅格单元的分布式水沙物理模型在国内的应用进行研究。在介绍 CASC2D-SED 概念的基础上, 研究其产流及产沙模块在国内半湿润地区以及产流模块在无资料地区径流模拟中的适用性。选取宁夏三关口流域以及好水川流域为典型研究流域, 对三关口流域 1983—1987 年 8 场洪水进行了产流及产沙过程模拟, 结果表明: 模型的产流及产沙模块在三关口流域均取得良好的模拟效果, 验证了模型的合理性及适用性。同时将三关口流域的参数移用于好水川流域, 进行 2010 年及 2011 年 4—9 月的径流模拟, 得到流域内 15 个计算点及流域出口处的日来水量, 经验证, 模型模拟结果可靠, 可用于无资料地区的径流模拟。

关键词: 防洪工程; CASC2D-SED; 产流产沙模拟; 分布式水沙物理模型; 无资料地区

中图分类号: TV146 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)02-0095-07

Application of physically distributed water-sand model CASC2D-SED

LI Zhijia¹, SHEN Jie¹, ZHANG Pengcheng², LI Juan³, YAO Cheng¹, GUO Yuan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Ningxia Ruiwo Water Resources Project Research Institute, Yinchuan 750021, China;
3. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: CASC2D-SED is a physically distributed water-sand model based on a grid unit. The application of this model to Chinese river basins was studied. Two scenarios were studied: in the semi-humid Jinghe River Basin with long-term measured flow and sediment data, we studied the applicability of the hydrological simulation, and in ungauged Weihe River Basin, we studied the applicability of the runoff module. The CASC2D-SED model was applied to the Sanguankou and Haoshuichuan watersheds in Ningxia. The model was used to simulate eight flood events in the Sanguankou Watershed from 1983 to 1987. The results show that the runoff module and the sediment module of the model can be applied to the study area with relatively high accuracy, verifying the rationality and applicability of the model. Then, the runoff module of the model was used for hydrological process simulations to obtain the daily water quantity of the outlet and 15 calculation points from April to September in 2010 and 2011 in the Haoshuichuan Watershed. The results show that the runoff module can provide accurate simulations and can be used for runoff simulation in ungauged basins.

Key words: flood control project; CASC2D-SED model; runoff and sediment simulation; physically distributed water-sand model; ungauged region

流域的水沙物理过程非常复杂。对流域侵蚀产沙与输沙过程的模拟, 国外进行了大量研究, 开发了通用土壤流失方程 (USLE)^[1]、产流产沙预报模型 (WEPP)^[2]、荷兰模型 (LISEM)^[3]、欧洲产流产沙预报模型 (EROSEM)^[4] 等。最初的模型大多属于集总式模型, 使用均一化处理的参数对水文泥沙过程进行平均化模

收稿日期: 2012-06-21
基金项目: 国家自然科学基金(41130639, 51179045, 41101017); 公益性行业(气象)科研专项(201006037)
作者简介: 李致家(1962—), 男, 山西运城人, 教授, 主要从事水文预报与流域水文模型研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com

拟,其结果无法真实地体现流域水文泥沙过程的时空分布特性^[5]。随着计算机技术、GIS 以及 RS 技术的发展,分布式模型成为当今水文预报、土壤侵蚀领域的研究重点与发展方向。

本文以分布式水沙物理模型 CASC2D-SED 的产流模块在国内湿润流域——舒家流域适用性研究为基础^[6],选取宁夏三关口流域及好水川流域为典型研究流域,进一步研究其产流及产沙模块在国内流域的适用性,以及产流模块在无资料地区径流模拟中的适用性。

1 CASC2D-SED 模型简述

CASC2D 模型最初的结构源于 Julien 教授对二维地面径流计算方法的发展^[6-7],他采用 APL 语言编写计算程序,之后模型被逐渐加入 Green-Ampt 下渗计算^[8-9]和一维显式扩散波河道计算^[10]、二维土壤侵蚀算法^[11]、地下径流模拟等,使得模型更加完善、系统化,模型名称也变更为 CASC2D-SED。

1.1 水流演算部分

1.1.1 降雨计算

当流域上只有 1 个雨量站时,认为降雨强度均匀分布,即每个栅格单元上的降雨强度与此雨量站的降雨强度一致;当流域上有多个雨量站时,采用距离平方倒数法插值估计每个栅格单元上的降雨强度,降雨强度在流域上是分布式的:

$$r_t(j,k)=\frac{\sum_{g=1}^Mr_{m,t}(j_m,k_m)\over d_m^2}{\sum_{g=1}^M\frac{1}{d_m^2}}$$

(1)

式中: $r_t(j,k)$ ——在 t 时刻栅格 (j,k) 处的降雨强度,mm/h; $r_{m,t}(j_m,k_m)$ ——位于栅格 (j_m,k_m) 处的 m 雨量站在 t 时刻的实测降雨强度,mm/h; d_m ——栅格 (j,k) 与 m 雨量站所在栅格 (j_m,k_m) 之间的距离,m; M ——雨量站总数。

1.1.2 截留计算

在 CASC2D-SED 中,计算下渗之前,先从降雨中扣除截留深,只有当累积的降雨深等于植物截留深 I 时,其后的降雨才不再扣除截留损失。 I 根据栅格对应的土地利用类型求得。

1.1.3 产流计算

在 CASC2D-SED 模型中,采用 Green-Ampt 产流模式。用 Green-Ampt 方程估算流域上每个栅格单元相应的下渗率:

$$f=K_s\left(\frac{H_cM_d}{F}+1\right)$$

(2)

式中: f ——下渗率,cm/h; K_s ——饱和土壤水力传导度,cm/h; H_c ——毛管水头,cm; M_d ——土壤缺水量,cm³/cm³; F ——累积下渗深度,cm。

1.1.4 坡面汇流计算

在 CASC2D-SED 中,坡面径流采用扩散波的二维显式有限差分来计算。

二维连续方程:

$$\frac{\partial h_o}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=e$$

(3)

式中: h_o ——地面径流的深度; q_x,q_y —— x,y 方向上的单宽流量; e ——超渗降雨量($p-f$); p ——降雨强度。

二维扩散波水流方程(简化动量方程):

$$S_{fx}=S_{ox}-\frac{\partial h_o}{\partial x}\qquad S_{fy}=S_{oy}-\frac{\partial h_o}{\partial y}$$

(4)

式中: S_{ox},S_{oy} —— x 和 y 方向的坡底比降,分别由数字高程模型计算; S_{fx},S_{fy} —— x 和 y 方向的坡底摩阻比降。

曼宁阻力方程:

$$\alpha_x=\frac{1}{n}S_{fx}^{\frac{1}{2}}h_o^{\frac{5}{3}}\qquad \alpha_y=\frac{1}{n}S_{fy}^{\frac{1}{2}}h_o^{\frac{5}{3}}$$

(5)

式中 n 是曼宁糙率系数。

1.1.5 河道汇流计算

CASC2D-SED 模型认为河道水流为一维明渠流,河道汇流计算采用一维显式有限差分扩散波方法。

一维连续方程：
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_0 \tag{6}$$

式中： A ——水流断面面积； Q ——河道流量； q_0 ——单位长度河道上的旁侧入流或出流。

一维扩散波方程：
$$S_f = S_c - \frac{\partial h_c}{\partial x} \tag{7}$$

式中： S_f ——河道摩擦比降； S_c ——河床底坡； h_c ——河道水深。

1.2 泥沙演算部分

1.2.1 地表侵蚀和泥沙输运

对于一个大小为 Δx 的网格,在一个时间间隔 Δt 内,网格内能产生的总泥沙体积 $\forall S_{KR}$ 由改进的 Kilinc & Richardson 输运能力方程 (KR 方程) 计算,公式如下：

$$\forall S_{KR} = 58\,390 S_0^{1.664} q^{2.035} KCP\Delta x\Delta t \tag{8}$$

式中： S_0 ——地表坡度； q ——单宽流量； K ——土壤侵蚀因数； C ——覆盖管理因数； P ——实践因数。

对流过程输运的粒级 i 中悬浮质运移量为

$$\forall S_{SUSi} = S_{SUSi} \frac{V\Delta t}{\Delta x} \tag{9}$$

式中： V ——平均流速, m/s； S_{SUSi} ——粒级 i 的悬浮颗粒量。

从源网格输移到接收网格的 $\forall S_{SUSi}$ 是对流输运量和 KR 方程计算的最大值：

$$\forall S_{SUSi} = \begin{cases} \max\left(S_{SUSi} \frac{V\Delta t}{\Delta x}; \forall S_{KR} \frac{S_{SUSi}}{\sum_{i=1}^3 S_{SUSi}}\right) & \forall S_{KR} < \sum_{i=1}^3 S_{SUSi} \\ S_{SUSi} & \forall S_{KR} \geq \sum_{i=1}^3 S_{SUSi} \end{cases} \tag{10}$$

从源网格输移到接收网格的粒级 i 床沙质运移量 $\forall S_{Bmi}$ 为

$$\forall S_{Bmi} = \begin{cases} C_{ET} \frac{S_{Bmi}}{\sum_{i=1}^3 S_{Bmi}} & C_{ET} < \sum_{i=1}^3 S_{Bmi} \\ S_{Bmi} & C_{ET} \geq \sum_{i=1}^3 S_{Bmi} \end{cases} \tag{11}$$

式中： S_{Bmi} ——源网格粒级 i 床沙质体积； C_{ET} ——水流的剩余运移能力,由下式计算：

$$C_{ET} = \max\left(0; \forall S_{KR} - \sum_{i=1}^3 \forall S_{SUSi}\right) \tag{12}$$

如果悬浮质和床沙质都被输运的情况下还有运移能力剩余,土壤母质会根据粒级 i 相应比例地被侵蚀：

$$\forall S_{EROSi} = (C_{ET} - \sum_{i=1}^3 \forall S_{Bmi}) P_i \tag{13}$$

式中： $\forall S_{EROSi}$ ——粒级 i 母质侵蚀容量； P_i ——粒级 i 在母质土壤中的侵蚀比例。

该算法提供了较好的解决流域产沙和水流运移能力有限条件下的泥沙输运方法。

1.2.2 河道泥沙输运

流域坡面侵蚀泥沙是通过河道输移到出口断面的。河道目前不允许侵蚀,但允许泥沙沉降。采用 Engelund & Hansen 方程计算河道泥沙运移能力。

单位时间 Δt 内粒级 i 泥沙颗粒的输移体积被估算为

$$\forall S_{EH_i} = \frac{QC_{wi}\Delta t}{2.65} \tag{14}$$

式中 C_{wi} 为按质量计算的粒级 i 泥沙平均质量浓度。

河道中通过对流作用输运的粒级 i 悬浮质运移量为

$$\forall S_{SUSi} = S_{SUSi} \frac{V\Delta t}{\Delta x} \tag{15}$$

用来搬运河道中粒级 i 床沙质的剩余运移能力为

$$C_{EBMi} = \max(0; \forall S_{EH_i} - \forall S_{SUS_i})$$

(16)

河道中通过对流作用输运的粒级 i 床沙质运移量为 $S_{B_{Mi}} \frac{V\Delta t}{\Delta x}$ 。

河道输运的粒级 i 床沙质运移量是剩余运移能力和粒级 i 对流运移床沙质的最小值:

$$\forall S_{B_{Mi}} = \min\left(C_{EBMi}; S_{B_{Mi}} \frac{V\Delta t}{\Delta x}\right)$$

(17)

如果还有输移能力剩余,这部分剩余输移能力将不使用。

1.2.3 悬浮泥沙沉降

假定粗沙、粉沙和黏土颗粒的中值粒径 d 已知,表 1 为其沉降速度的估算。

悬浮颗粒部分在坡地和河道网格中都允许沉降,CASC2D-SED 假定一个离散的颗粒沉降模式,颗粒彼此独立沉降,互不影响,粒级 i 悬浮泥沙沉降比率 P_{Si} 由下式确定:

$$P_{Si} = \begin{cases} w_i \frac{\Delta t}{h} & h > w_i \Delta t \\ 1 & h \leq w_i \Delta t \end{cases}$$

(18)

式中: w_i ——中值粒径估算的沉降速度,m/s; h ——网格水深,m。

模型计算过程中一个时间间隔内网格悬浮泥沙沉降量从悬浮泥沙中减去,加到沉积沉降量中。该算法提高了回水区域悬移质颗粒连续沉降算法的计算效率。

1.3 单元流域划分与参数

采用正交网格划分单元流域。模型参数有:植物截留深;土壤饱和和水力传导度,毛管水头,土壤缺水量;坡面的曼宁糙率系数;河道的宽度、深度、糙率等。这些参数都是栅格式空间分布的,其中植物截留深与栅格的土地利用相关,下渗参数与土壤类型相关。河道宽度和深度等参数的率定应以实际资料为参考。本文采用人工试错法进行参数率定。

2 典型研究流域概况

2.1 流域 I 概况

选取宁夏三关口流域为典型研究流域 I,流域有产期的降雨径流资料。流域位于六盘山地区的固原市泾源县境内,即东经 $106^{\circ} \sim 107^{\circ}$ 、北纬 $35^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 之间,是泾河上游支流颛河的上游,总面积为 218 km^2 。气候属温带湿润、半湿润气候区,具有春寒、无夏、秋短、冬长的特点,年平均气温 5.7°C 。

流域多年平均降水量 547 mm ,降水量年内分布有明显的典型大陆性特点,主要集中在 6—9 月。流域多年平均径流深 111 mm ,多年平均径流量 2777 万 m^3 。

2.2 流域 II 概况

选取宁夏好水川流域为典型研究流域 II。好水川流域缺乏径流观测资料,但有长期的降雨资料。流域位于六盘山西侧,宁夏回族自治区隆德县境内,是渭河上游支流葫芦河上游左岸一级支流的上游,地理坐标为东经 $105^{\circ}56' \sim 106^{\circ}15'$ 、北纬 $35^{\circ}38' \sim 35^{\circ}45'$,平均气温 5.1°C ,流域总面积为 102 km^2 。流域多年平均降水量 517 mm ,多年平均水面蒸发量 900 mm ,干旱指数为 1.5,流域内由于土壤沙化,植被覆盖率低,流水侵蚀比较严重。

3 模型在典型研究流域 I 的应用

3.1 模型输入及参数率定

模型的输入数据包括降雨量、实测流量、实测沙

表 1 颗粒中值直径和沉降速度

Table 1 Particle's median diameter and fall velocity

粒级	d/mm	$w_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
粗沙	0.350	0.036
粉沙	0.016	2.20×10^{-4}
黏土	0.001	8.60×10^{-7}



图 1 三关口流域河道及站点分布

Fig. 1 Channels and stations of Sanguankou Watershed

量、流域 90 m×90 m DEM、河道数据(图 1)、土地利用(图 2)以及土壤类型资料。DEM 资料来自于美国地质调查局(USGS)公共域免费提供的 90 m×90 m 的 DEM 数据,利用 arcGIS 软件处理 DEM 数据。流域内有 4 个雨量站:大湾、什字、清水沟、三关口,其中清水沟及三关口也是流量站,本文采用三关口的流量资料,其站点分布见图 1。

模拟时段步长选取 2 s,降雨资料的输入时段长是 0.5 h,在一个时段内雨强是不变的。实测流量、沙量数据的时间间隔不均匀,采用线性插值,将实测流量、沙量资料的时段长整理为 0.5 h。模型的输出时段长为计算步长的倍数,输出时段可以是 1 min,5 min。为了对应于整理的实测流量、沙量时段长,将模型的模拟流量、沙量输出时段长也定为 0.5 h。

首先根据实测数据确定参数,然后根据流域 DEM 数据、土地利用类型、土壤类型及河道特征估算模型参数,最后对一些敏感的参数如土壤饱和和水力传导度、毛管水头、土壤侵蚀因数等再进行率定。产流参数率定、验证完成后,固定产流参数再进行泥沙参数的率定及验证。模型参数见表 2 和表 3。

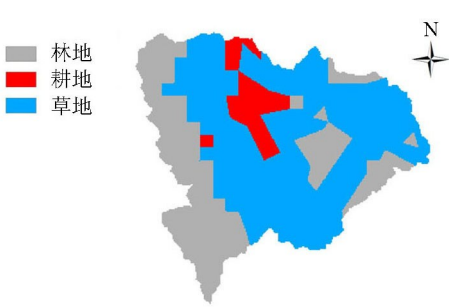


图 2 三关口流域土地利用情况
Fig. 2 Land use in Sanguankou Watershed

表 2 土地利用参数 Table 2 Land use parameters					
土地利用类型	土地利用类型指数	截留深度/mm	糙率	覆盖管理因数	实践因数
林地	1	1.50	0.25	0.15	1
耕地	2	1.00	0.15	0.40	1
草地	3	0.75	0.20	0.30	1

表 3 土壤参数值及组成 Table 3 Soil parameters and percentage composition							
土壤类型	土壤参数		下渗参数		质量分数/%		
	土壤类型指数	土壤侵蚀因数	饱和水力传导度/(cm·h ⁻¹)	毛管水头/cm	沙粒	粉沙粒	黏粒
黑垆土	1	0.7	0.202	13	0.3	0.6	0.1

3.2 模型模拟结果

对三关口流域 1983—1987 年的 8 场洪水进行产流、产沙模拟。其中前 5 场洪水对模型参数进行率定,后 3 场洪水对模型进行验证。首先进行产流参数的率定及验证,产流模拟结果的相关特征值见表 4。

表 4 CASC2D-SED 模型产流模拟结果特征值 Table 4 Runoff statistical values simulated by CASC2D-SED model in Sanguankou Watershed										
模型应用	洪号	洪水场次	总雨量/mm	实测洪量/万 m ³	预报洪量/万 m ³	洪量相对误差/%	实测洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)	预报洪峰/(m ³ ·s ⁻¹)	洪峰相对误差/%	确定性系数
率定	1	19830630	25.05	10.39	10.67	2.65	12.50	11.00	-12.00	0.74
	2	19830904	32.72	13.59	15.66	15.23	19.90	17.49	-12.11	0.72
	3	19840724	68.45	52.30	42.85	-18.07	60.70	58.95	-2.88	0.70
	4	19850511	36.76	30.97	30.77	-0.65	39.50	39.03	-1.19	0.84
	5	19850811	36.18	43.02	46.39	7.83	60.00	53.72	-10.47	0.93
验证	6	19860624	34.88	29.82	19.93	-33.17	19.40	19.37	-0.15	0.72
	7	19870523	41.96	17.60	19.35	9.94	24.60	22.84	-7.15	0.70
	8	19870816	26.15	21.38	25.40	18.80	35.90	35.35	-1.53	0.85

固定产流参数,进行泥沙参数的率定及验证。泥沙模拟结果的相关特征值见表 5。

19860624 场洪水的流量、沙量实测模拟对比见图 3。从模拟结果看,模型在三关口流域的产流模拟效果较好,8 场洪水的确定性系数均在 0.70 以上,且均值为 0.78。洪峰相对误差合格率为 100%,洪量相对误差合格率为 88%,只有 19860624 场洪水洪量相对误差不合格。产沙模拟效果良好,8 场洪水中有 6 场洪水的

表 5 CASC2-SED 模型产沙模拟结果特征值
Table 5 Sediment statistical values simulated by CASC2D-SED model

模型应用	洪号	洪水场次	总雨量/ mm	实测沙峰 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	预报沙峰 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	沙峰相对 误差/%	确定性 系数
率定	1	19830630	25.05	1.18	1.05	-11.31	0.77
	2	19830904	32.72	1.73	1.61	-6.94	0.92
	3	19840724	68.45	3.51	4.13	17.66	0.65
	4	19850511	36.76	4.71	2.10	-55.41	0.67
	5	19850811	36.18	5.85	5.73	-2.05	0.84
验证	6	19860624	34.88	0.81	0.76	-6.17	0.70
	7	19870523	41.96	3.00	2.05	-31.67	0.79
	8	19870816	26.15	1.68	1.75	4.17	0.76

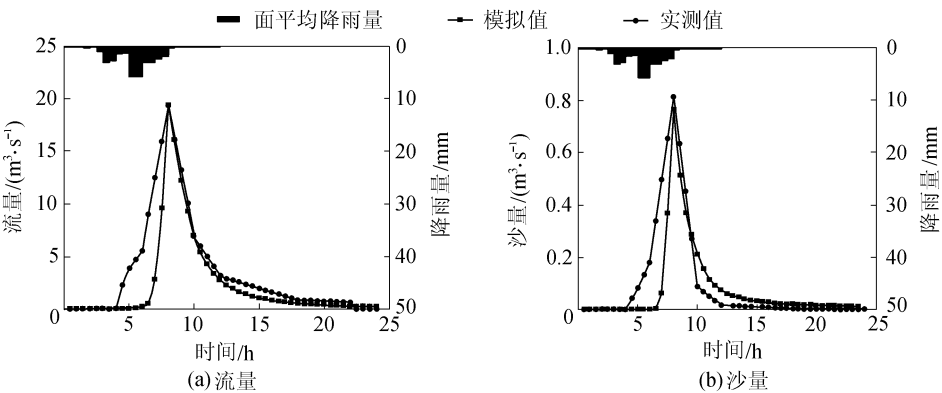


图 3 19860624 场洪水实测模拟对比过程

Fig. 3 Hydrographs of observed and simulated data of flood No. 19860624

确定性系数在 0.70 以上,且均值为 0.76,沙峰相对误差合格率为 75%,洪水呈陡涨陡落情况。

a. 产沙模拟精度略低于产流模拟精度。由于未能融入流域下垫面^[12-13]变化信息,得到的土地利用类型及土壤类型分布不精确,这必然会影响到模型的模拟精度,同时会影响模型参数率定,而产沙模块中的参数较产流模块中多,故产沙模拟精度低于产流模拟精度。

b. 洪峰及沙峰普遍偏低。这是由于每个栅格上的降水量均由研究区域内雨量站的实测降水资料整理得到,降雨的时空分布与实际情形有一定的出入,给产流、产沙计算带来一定的误差。另外,由于实测资料时段长取 0.5 h,原始记录降雨量、流量和沙量资料有一定程度的均化,可能会错过降雨、流量和沙量的峰值。

c. 从模拟的洪水过程线来看,洪水退水过程快,这是由于 CASC2D-SED 模型在产流计算上采用的是基于霍顿产流机制的 Green-Ampt 下渗,没有壤中流和地下径流的支持,洪水过程呈现陡涨陡落情况。

4 模型在典型研究流域 II 的应用

4.1 研究方法

对于有实测径流资料的流域,一般是运用实际的观测资料对模型参数进行率定、验证之后再用于径流模拟;对于无实测径流资料的流域,一般采用区域化的思想,包括:(a)以包括所研究的无资料子流域在内的一个大的区域作为研究对象,应用该区域内其他有实测资料的流域优选模型参数,并对优选的参数值求均值,之后再移用于该无资料流域;(b)通过地形特征推求模型参数;(c)应用区域回归分析推求模型参数;(d)直接移用临近的相似流域资料。本文选用第(d)方法,将黄河上游三关口流域的参数移用于临近无资料流域——好水川流域,检验 CASC2D-SED 模型的产流模块在无资料地区的适用性。

4.2 模型输入及参数率定

模型的输入数据包括降雨、实测流量、流域 90 m×90 m DEM、河道数据(图 4)、土地利用(图 5)以及土壤类型资料。土地利用类型有:林地、水面、耕地、草地。流域内土壤为黑垆土。流域内有 2 个雨量站:张银、杨河,15 个计算点:阴山、兰家湾、范湾、上岔、张家台子、后沟、下老庄、团结、后海子、张银、岔口、下岔、何家岔、阳山庄、老张沟。

模型时段步长选取 2 s,降雨资料的输入时段长 0.5 h,实测流量资料的时段长及模拟流量输出时段长均

定为 0.5 h。

由于好水川流域与三关口流域多年平均降水量均超过 500 mm,降雨年内分布均有明显的典型大陆性特点,主要集中在 6—9 月,且两流域均位于六盘山地区,植被相近,流域内土壤均为黑垆土,所以好水川流域的参数移用三关口流域的参数。

4.3 模型模拟结果

好水川流域缺乏径流观测值,但有长期的降雨资料。根据杨河站及张银站 2010—2011 年 4—9 月的实测降雨资料,采用 CASC2D-SED 中的产流模块进行降雨径流模拟,得到 15 个计算点的流量过程,并计算得到日来水量。由于好水川流域无实测径流资料进行对比,故将模拟计算得到的日来水量交由相关部门验证。经验证,模拟计算得到的日来水量是合理的,说明将三关口流域的参数移用于好水川流域后,CASC2D-SED 模型的计算结果是可靠的。

从以上结果看,CASC2D-SED 模型在三关口流域的产流模拟中计算精度良好,将其移用于相似流域好水川流域时,模拟结果也是合理的,说明 CASC2D-SED 模型可用于无资料地区的径流模拟。

5 结 语

随着地理信息系统、遥感技术以及气象卫星的进一步发展,资料的空间分辨率将会更高,可以更准确地反映流域的地形、土地利用、土壤和河道资料,分布式水沙物理模型将会得到更好的数据支持;在解决资料问题后,随着计算机技术的进一步发展,模型自身结构的不断优化以及模型算法的不断完善,分布式水沙物理模型 CASC2D-SED 的运行速度将不断提高,模拟精度将会更加优良且稳定。

参考文献:

[1] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. Washington D. C. : Agriculture Handbook, 1978.

[2] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5) : 1587-1593.

[3] de ROO A P J, WESSELING C G, RITSEMA C J. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8) : 1107-1118.

[4] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European soil erosion model(EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527-544.

[5] 曹文洪, 祁伟, 郭庆超, 等. 小流域产汇流分布式模型[J]. 水利学报, 2003, 34(9) : 48-54. (CAO Wenhong, QI Wei, GUO Qingchao, et al. Distributed model for simulating runoff yield in small watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9) : 48-54. (in Chinese))

[6] 李致家, 胡伟升, 丁杰, 等. 基于物理基础与基于栅格的分布式水文模型研究[J]. 水力发电学报, 2012(2) : 5-13. (LI Zhijia, HU Weisheng, DING Jie, et al. Study on distributed hydrological model of solving physical equation on grids[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012(2) : 5-13. (in Chinese))

[7] JULIEN P Y, SAGHAFIAN B. CASC2D user manual-a two dimensional watershed rainfall-runoff Model[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1991.

[8] GREEN W H, AMPT G A. The flow of air and water through soils[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 4: 1-24.

[9] RAY K, LINSLEY J, MAX A, et al. Hydrology for engineers[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1982.

[10] OGDEN F L. De-St Venant channel routing in distributed hydrologic modeling[J]. Hydraulic Engineering, 1994, 1: 492-496.

[11] JULIEN P, ROJAS R. Upland erosion modeling with CASC2D-SED[J]. International Journal of Sediment Research, 2002, 17(4) : 265-274.

[12] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1993.

[13] ANDERSON M G, MCDONNELL J J. Encyclopedia of hydrologic science[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2005.



图 4 好水川流域河道

Fig. 4 Channels of Haoshuichuan Watershed

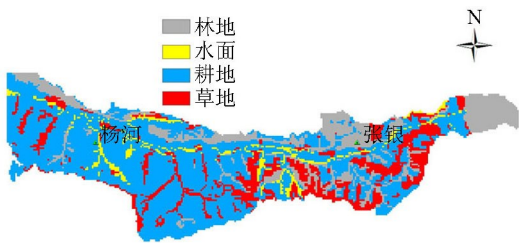


图 5 好水川流域的土地利用

Fig. 5 Land use in Haoshuichuan Watershed