

基于较高精度土壤库的三峡水库汇水区径流模拟

赵佳婧, 张万顺, 王永桂, 石荧原, 陈肖敏

(武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要:土壤参数控制了水和空气在土壤界面的运动,对区域内水分循环产生主要影响。三峡库区土壤种类繁多,区域分异明显,且同一种土壤在不同地区的理化性质也不尽相同。为了能更加精确地模拟库区径流过程,基于SWAT模型,采用了高精度的土壤空间数据,系统研究了土壤属性参数的确定方法,建立了高精度的土壤数据库。用LH-OAT方法、SWAT-CUP软件及SUFI-2算法进行了参数敏感性分析、参数率定、模型验证和不确定性分析,对三峡库区2010—2013年的日径流过程进行模拟。结果表明:对径流模拟影响最明显的5个土壤参数为SOL_AWC, SOL_Z, SOL_K, SOL_CBN和SOL_BD。6个水文站率定期和验证期的平均确定性系数、平均纳什效率系数、平均相对误差分别为:0.818, 0.798, 6.778%, 流量模拟值与实测值过程线总体拟合程度较好。研究揭示了土壤参数对径流模拟的潜在影响作用,为大尺度流域水文模拟和区域水量平衡研究可提供基础支持。

关键词:三峡库区; 土壤参数; SWAT; 径流模拟; SUFI-2算法

中图分类号:P334⁺.92; TV121

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0045-08

Runoff Simulation Based on a High-Precision Soil Database in the Three Gorges Reservoir Catchment

ZHAO Jiajing, ZHANG Wanshun, WANG Yonggui, SHI Yingyuan, CHEN Xiaomin

(School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Soil parameters control the movement of air and water in the soil slope, and have the major influence on regional water cycle. Soil types in the three Gorges Reservoir Region are numerous, and there are obvious differences among them. In addition, physical and chemical properties of the same soil are not identical in different regions. In order to simulate the runoff process of the reservoir region more accurately, we studied the best method of determining soil attribute data based on SWAT model, and established a high-precision soil database combining the attribute data and a high precise spatial data. We simulated the daily runoff process from 2010 to 2013 of the Three Gorges Reservoir Region. LH-OAT method, SWAT-CUP and SUFI-2 were used for sensitivity analysis, calibration, validation and uncertainty analysis. The results showed that the top 5 sensitive soil parameters are SOL_AWC, SOL_Z, SOL_K, SOL_CBN and SOL_BD. The mean coefficient of determination, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and absolute percentage error were 0.818, 0.798, and 6.778%, respectively. The model performed well in simulating runoff process and the result was accurate. This research reveals the potential influence of soil parameters during the process of runoff simulation, and provides important basic support for hydrological simulation in large-scale watersheds and regional water balance research.

Keywords: Three Gorges Reservoir Region; soil parameters; SWAT; runoff simulation; SUFI-2 Algorithm

三峡库区是长江中下游地区的生态屏障,是我国淡水资源的战略储备库,是国家南水北调计划中的重要调水区域,具有重要的战略地位^[1-2]。近年来,随着社会经济的发展和生产活动的加强,流域内非点源污染风险大大增加^[3],而库区复杂的土壤状况和水文情

势加大了对水环境风险的应对和处理难度^[4-5]。SWAT具有完整的水文机理,可以预测多种土壤类型和土地利用方式下大面积复杂流域的地表水与地下水的水量 and 水质过程,并通过将流域划分为子流域(subbasin)与水文响应单元(HRU),以更加准确的

方式模拟流域内的水文过程,适合对三峡库区进行模拟研究^[6-7]。

在 SWAT 研究的各种问题中,水量平衡始终是流域内所有过程的驱动力。而土壤参数控制了水和空气在土壤界面的运动,同时对 HRU 内水分的循环产生主要影响^[8-9]。但是本研究的瓶颈在于:SWAT 模型中的初始值均是在基于美国德州 Temple station 试验站的监测数据计算而来,模型土壤数据库与我国的实际情况有较大出入,而且模型所需要的属性数据和国内现有的标准不一致,导致目前无可直接使用的基础数据库^[10-12]。因此在实际应用时,为了提高模型的适用性和模拟的精度,需构建适用于三峡库区特点的土壤数据库。

目前,已有学者对我国 SWAT 土壤数据库的构建方法进行了研究,并在我国各地区流域均取得了较为理想的效果^[10-12]。但是,这些研究仅仅局限于中小尺度流域,对大尺度流域土壤参数的本地化和精细化方面还缺乏研究。本文以三峡库区为研究对象,系统研究大尺度流域 SWAT 土壤参数的确定方法和土壤数据库的构建过程,以期模拟预测三峡流域水质水量提供基础,并为 SWAT 在我国的推广应用提供借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区地处我国地势第二级阶梯的东缘,库区总面积约为 5.8 万 km²,江河纵横、水系发达,干流长达 660 km,有次级支流 400 多条。属亚热带季风性湿润气候,年均气温 14.9~18.5℃,年均降水量 1 045~1 140 mm,降雨多集中在 4—10 月,河流补给以降水补给为主^[2]。流域内土壤以紫色土和黄壤为主,分别占总面积的 27.07%和 19.35%。库区南北高、中间低,地势落差大,土壤类型组合区域分异明显。土体较薄,砂粒含量高、粉砂粒含量适中,质地以砂质黏壤土居多,土质疏松,抗蚀能力较弱,降水时极易形成地表径流和冲沟。紫色土区域由于严重的水土流失,成土物质不断更新和堆积,加之亚热带气候条件下物质循环强烈和垦殖率高、复种指数高等因素,有机质在土壤中难于积累。黄壤分布于湿润多雨的中山地貌区,湿度较高、又由于植被茂密,有机质含量较为丰富^[13]。

1.2 土壤空间数据库的构建

土壤空间数据库主要是指数字化的土壤类型图。土壤类型数据是生成水文响应单元的基础,主要包括不同土壤类型分布的面积和周长。这些数据具有很

强的空间变异性,不仅能够表现出流域的形态信息,而且还能表示属性信息与空间信息的关系,起到空间再现和空间分析的作用。因此,准确地获取高质量的土壤数据是进行模型模拟的先决条件。

本研究的土壤空间数据来源于中国科学院南京土壤研究所,精度为 1:50 万。构建空间数据库时,本研究选用我国分类标准下的土壤亚类作为 SWAT 土壤类型标准,以充分保证土壤参数的精度。模型要求所有空间数据应具有统一的地理坐标和投影,以便为空间数据叠加分析及水文单元划分提供基础。通用横轴墨卡托格网(UTM)系统适用于全世界,其将地球表面划分为 60 个带。三峡库区位于东经 105°49′—111°39′,北纬 28°28′—31°44′,位于 UTM 的 48 N 分带。因此选择投影坐标为 WGS_1984_Zone_48 N。

SWAT 运行时,需在界面上载入土壤类型数据,因此需要制作土壤类型数据载入索引表,对各土壤亚类进行模型编码,见表 1。

表 1 主要土壤类型数据载入索引

土壤 亚类	亚类 代码	模型 编码	面积/ km ²	周长/ km	占比/ %
水稻土	23119101	1	8625.63	18792.65	12.45
淹育水稻土	23119103	2	64.49	111.26	0.09
渗育水稻土	23119104	3	830.06	1016.89	1.20
漂洗水稻土	23119107	4	26.87	30.38	0.04
潜育水稻土	23119105	5	26.34	39.33	0.04
潜育水稻土	23119102	6	260.60	976.84	0.38
棕色石灰土	23115154	8	171.35	871.26	0.25
石灰(岩)土	23115151	9	9154.36	12615.18	13.22
黄色石灰土	23115155	10	677.67	1510.83	0.98
黑色石灰土	23115153	11	204.10	440.96	0.29
粗骨土	23115191	12	86.43	565.47	0.12
酸性粗骨土	23115192	13	84.13	316.50	0.12
钙质粗骨土	23115194	14	19.67	66.74	0.03
中性紫色土	23115173	15	2596.62	4389.11	3.75
石灰性紫色土	23115174	16	1698.85	2246.11	2.45
紫色土	23115171	17	19922.48	19165.18	28.76
酸性紫色土	23115172	18	1003.04	1027.84	1.45
山地灌丛草甸土	23116123	19	78.33	225.74	0.11
暗棕壤	23110151	25	75.00	408.54	0.17
棕壤	23110141	26	22.92	4505.72	1.99
棕壤性土	23110144	27	773.33	165.58	0.12
白浆化棕壤	23110142	28	7.21	15.21	0.004
暗黄棕壤	23110122	29	118.06	4545.40	2.78
黄棕壤	23110121	30	1375.93	11137.37	6.38
黄棕壤性土	23110123	31	82.22	1195.96	0.71
黄褐土	23110131	32	3.08	654.89	0.60
漂洗黄壤	23121132	38	1928.74	138.86	0.08
黄壤	23121131	39	4421.57	19022.69	19.51
黄壤性土	23121134	40	493.91	1855.85	0.64

1.3 土壤属性数据库的构建

SWAT 模型的土壤属性数据包含水文、作物生长、营养元素分配等参数,直接关系到研究区域内水以及氮磷等污染物在土壤中的迁移转化过程,决定着地表径流的产流机制。土壤属性数据包括土壤的物理属性数据和化学属性数据,其中,物理属性数据决

定了土壤剖面中水和气的运动状况,并且对水文响应单元(HRU)中的水循环起着重要作用;化学属性数据主要是给氮磷等污染物的浓度赋初值^[8-9,14-15]。土壤化学属性数据通过查询全国第二次土壤普查数据即可获得,因此本研究着重考虑土壤物理属性数据库的构建,见表 2。

表 2 SWAT 模型土壤主要物理属性输入表

变量名称	模型定义
SNAM	土壤名称
NLAYERS	输入的土壤层数
HYDGRP	土壤水文学分组(A,B,C 或 D)。
SOL_ZMX	土壤剖面最大根系深度(mm)。范围:0.00~3500.00 mm
ANION_EXCL	土壤阴离子交换孔隙度。模型默认值:0.5,范围:0.01~1.00
SOL_CRK	土壤剖面最大裂缝体积,用占土壤体积的比例表示。模型默认值:0.5
TEXTURE	土壤层的结构,模型不处理该数据,为可选项
SOL_Z	土壤表层到土壤底层的深度(mm)。范围:0.00~3500.00
SOL_BD	土壤容重(g/cm ³),范围:1.10~2.50
SOL_AWC	土壤的有效含水量(mm/mm),范围:0.00~1.00
SOL_K	土壤的饱和渗透系数(mm/h),范围:0.00~2000.00
SOL_CBN	土壤中的有机碳含量(%),范围:0.05~10.00
CLAY	黏粒指粒径<0.002 mm 的土壤颗粒含量(%)
SILT	粉粒指粒径介于 0.002~0.05 mm 之间的土壤颗粒含量(%)
SAND	砂粒指粒径介于 0.05~2.0 mm 之间的土壤颗粒含量(%)
ROCK	砾石指粒径>2.0 mm 的小石子的含量(%)
SOL_ALB	湿土对太阳辐射的反射率(%),范围:0.00~0.25
USLE_K	通用土壤流失方程中的土壤侵蚀因子 K,范围:0.00~0.65

1.3.1 初始参数获取 根据中国科学院“十一五”信息化建设专项“数据应用环境建设和服务”项目提供的《中国土壤数据库》以及全国第二次土壤普查成果《中国土壤》,并结合实地土壤剖面调查,可得各土壤类型的剖面最大根系深度(SOL_ZMX)、各土壤表层到土壤底层的深度(SOL_Z)、土壤粒径(CLAY, SILT,SAND)百分比、砾石(ROCK)含量以及土壤有机质含量。采用国际上通用的 Bemmelan 的研究成果:有机质含量的 58%即为碳含量转换系数,算得土壤有机碳含量(SOL_CBN)^[16]。

1.3.2 土壤粒径转换 土壤粒径大小对土壤水力学性质有着强烈的影响,决定了模型模拟的精度。本研究查询得到的土壤粒径百分比是基于全国第二次土壤普查所得,采用的单位是国际制。而 SWAT 中采用的单位是 USDA 简化的美制,见表 3。因此,需要进行土壤粒径转换。

采用三次样条插值法进行土壤粒径转换^[17-18]。具体计算方法为:(1)先对各有效粒径的机械组成百分比做累积计算;(2)计算各有效粒径的对数值;(3)编写 Matlab 程序,把有效粒径对数值和对应的累积计算值代入程序计算。

表 3 土壤粒径分类标准比较

美国制/mm	国际制/mm
黏粒(<0.002)	黏粒(<0.002)
粉粒(0.05~0.002)	粉粒(0.002~0.02)
砂粒(0.05~2.0)	细砂粒(0.02~0.2)
—	粗砂粒(0.2~2)

1.3.3 土壤水分参数的确定 土壤的水分参数包括土壤的有效含水量(SOL_AWC),土壤容重(SOL_BD)及饱和渗透系数(SOL_K)等。采用美国华盛顿州立大学开发的 SPAW (Soil-Plant-Air-Water) 软件^[19],通过黏粒(Clay)、砂粒(Sand)、有机质含量(Organic Matter)、含盐度(Salinity)、石砾含量(Gravel)等参数精确地估算土壤的水分参数。具体操作时,将模型单位转换为与 SWAT 匹配的 Metric 制,输入参数,运行软件,将计算得到的凋萎系数(Wilting Point)的值输入 Moisture Calculator 处,即可得到 SWAT 模型所需的土层质地(Texture)值 Texture Class、土壤容重(SOL_BD)值 Metric Bulk Density、饱和水力传导系数(SOL_K)值 Sat Hydraulic Cond 以及凋萎系数值 Wilting Point 和田间持水量值 Field Capacity。由凋萎系数和田间持水量可计算得出有效田间持水量值(SOL_AWC)。

SOL_AWC=Field Capacity-Wilting Point (1)

1.3.4 土壤水文学分组 (HYDGRP) 的确定

HYDGRP 即土壤水动力分组 (A, B, C 或 D)。其定义为:水动力组为在相似降雨和地表覆盖的条件下拥有相似潜在径流的土壤^[20]。A:即使在完全湿润的情况下土壤仍有极高的渗透率,能充分快速地排水,该类土壤发生径流潜在可能性较小。B:在完全湿润的情况下土壤有中等渗透率,排水性适中,这种土壤发生径流潜在可能性适中。C:在完全湿润的情况下土壤渗透率较低,排水性很差,该类土壤发生径流潜在可能性大。D:在完全湿润的情况下土壤的渗透率极低,该类土壤发生径流潜在可能性极大,见表 4。

表 4 水文分组单元评级标准

水文分组	土壤的饱和渗透系数/(mm·h ⁻¹)
A	7.6~11.4
B	3.8~7.6
C	1.3~3.8
D	0~1.3

本研究运用饱和和水力传导系数 (SOL_K), 参照表 4 进行土壤水文学分组的判定。

1.3.5 湿土反射率的确定 湿土反射率 (SOL_ALB) 的大小主要取决于土壤颜色的深浅、土壤有机质含量的高低和土壤含水量的多少^[21]。一般情况下,土壤颜色越深、有机质含量越高、土壤含水量越多,反射率就越小。采用 SOL_ALB 与 SOL_CBN 之间的经验关系式进行湿土反射率的确定^[10-12]。

$SOL_ALB = 0.2227 \exp(-1.8672 SOL_CBN)$ (2)

1.3.6 土壤侵蚀因子的确定 SWAT 模型中运用修正的通用土壤流失方程 MUSLE, 来计算由降雨和径流引起的侵蚀。采用 Wischmeier 等^[22]提出的用于土壤可蚀性因子的通用方程进行土壤可蚀性因子的测定。

$$K_{USLE} = \frac{0.00021M^{1.14}(12-OM)+3.25(c_{soilstr}-2)+2.5(c_{perm}-3)}{100} \quad (3)$$

式中: M 为颗粒尺度参数, 计算方法为 (粉砂百分数 + 极细砂百分数) \times (100 - 黏粒百分数); OM 为有机质含量 (%); $c_{soilstr}$ 为土壤分类中的结构代码; c_{perm} 为土壤坡面渗透性等级, 可分为 1~6 个等级。

具体计算方法如下:

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-ci} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (4)$$

式中: f_{csand} 表示高含沙量土壤的低可蚀性因子及低含沙量土壤的高可蚀性因子; f_{cl-ci} 表示黏粒/粉粒值高的土壤的低可蚀性因子; f_{orgc} 表示高有机碳含量土壤可蚀性减小因子; f_{hisand} 表示极高含沙量土壤可蚀性减小因子。

这些因子的计算式如下:

$$f_{csand} = 0.2 + 0.3 \exp\left[-0.256m_s\left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right] \quad (5)$$

$$f_{cl-ci} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0.3} \quad (6)$$

$$f_{orgc} = 1 - \frac{0.25orgC}{orgC + \exp(3.72 - 2.95orgC)} \quad (7)$$

$$f_{hisand} = 1 - \frac{0.7\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left[-5.51 + 22.9\left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]} \quad (8)$$

式中: m_s 表示沙粒 (直径为 0.05~2.00 mm 的颗粒) 的含量; m_{silt} 表示粉粒 (直径为 0.002~0.05 mm 的颗粒) 的含量; m_c 表示黏粒 (直径 < 0.002 的颗粒) 的含量; $orgC$ 表示该层中有机碳的含量 (%)。

按上述步骤所建土壤属性数据库的主要结果见表 5。

2 结果与分析

利用本研究所建立的土壤数据库以及三峡库区流域 DEM (数字高程模型)、土地利用、气象、水系数据, 可建立三峡水库流域的 ArcSWAT 模型。在其他参数都已基本确定的情况下, 为证明所建土壤数据库的适用性, 需对其进行敏感性分析以及率定与验证。

2.1 参数敏感性分析

本研究采用 SWAT 自带的 LH-OAT 方法^[23], 以日为尺度, 对 18 个土壤参数进行敏感性分析。该方法的优点是: 确保所有的参数在其取值范围内均被采样, 可明确地确定哪一个参数改变了模型的输出, 从而减少需要调整的参数数目, 提高计算的效率。参数的绝对值越大表明参数对模型的预测结果影响越明显。

设定所有 HRU 范围内的参数值均改变, 模型运行 500 次, 得出敏感性较高的土壤参数有 SOL_AWC, SOL_Z, SOL_K, SOL_CBN 和 SOL_BD, 见表 6。

2.2 参数率定与模型验证

本研究选择瑞士联邦水科学与技术研究所 (EAWAG) 研发的 SWAT 率定分析工具 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs) 软件^[24]以及连续不确定性匹配算法 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting algorithm)^[25]对上述 5 个敏感性参数进行率定及验证。参数的初始值取所建土壤数据库中相应的参数值: 库区共有 29 种土壤, 每种土壤都取上三层 (土壤层数集划分依据全国第二次土壤普查剖面数据进行确定) 进行 SWAT 模型模拟, 每种土壤每层对应的这 5 种参数值都不尽相同, 所以分别取这些土壤参数中的最小值和最大值作为初始值的取值范围。SUFI-2 方法前一次计算的适应性评价指标与各参数之间的相关性, 将为下一次运行该算法提供新的推荐参数范围。

表 5 三峡库区 SWAT 土壤属性数据库主要参数

土壤	参数						
	NLAYERS	HYDGRP	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	USLE_K
水稻土	3	A	1.35	0.16	15.71	2.00	0.34
淹育水稻土	2	A	1.54	0.12	9.19	0.56	0.28
渗育水稻土	3	A	1.36	0.16	14.36	1.79	0.35
漂洗水稻土	3	B	1.24	0.14	6.38	2.49	0.35
潜育水稻土	3	B	1.31	0.17	7.70	1.73	0.38
潴育水稻土	3	B	1.31	0.16	4.51	1.29	0.38
棕色石灰土	3	D	1.33	0.12	1.14	1.29	0.28
石灰(岩)土	3	C	1.32	0.15	7.07	1.95	0.33
黄色石灰土	3	C	1.36	0.14	2.31	1.02	0.32
黑色石灰土	3	C	1.31	0.14	4.71	2.17	0.31
粗骨土	3	A	1.37	0.14	11.23	1.94	0.30
酸性粗骨土	2	A	1.49	0.07	74.56	1.11	0.19
钙质粗骨土	2	A	1.37	0.17	15.8	1.73	0.36
中性紫色土	3	C	1.33	0.14	2.15	1.00	0.34
石灰性紫色土	3	B	1.49	0.15	6.88	0.70	0.35
紫色土	3	C	1.32	0.14	2.15	1.00	0.34
酸性紫色土	3	C	1.36	0.14	2.31	0.78	0.35
山地灌丛草甸土	2	A	1.08	0.16	64.48	4.06	0.31
暗棕壤	3	A	1.03	0.18	28.26	5.56	0.36
棕壤	3	A	1.41	0.15	37.59	1.64	0.34
棕壤性土	3	A	0.92	0.20	82.45	5.84	0.36
白浆化棕壤	3	B	1.42	0.15	6.12	1.03	0.35
暗黄棕壤	3	B	1.41	0.14	3.31	1.04	0.31
黄棕壤	3	A	1.47	0.13	14.72	1.36	0.28
黄棕壤性土	3	A	0.97	0.2	74.16	4.30	0.36
黄褐土	3	A	1.45	0.15	5.03	0.81	0.34
漂洗黄壤	3	B	1.41	0.17	5.95	0.99	0.39
黄壤	3	B	1.27	0.18	11.54	2.05	0.39
黄壤性土	3	A	1.53	0.09	40.2	0.94	0.23

表 6 参数敏感性分析结果

参数名称	<i>t</i> 的绝对值	<i>p</i> 值
SOL_AWC	5.24	0.00
SOL_Z	2.85	0.00
SOL_K	2.49	0.01
SOL_CBN	1.14	0.25
SOL_BD	0.27	0.79

注:(1) *t* 值表示参数的敏感性;*t* 的绝对值越大,参数越敏感;(2) *p* 值表示 *t* 值的显著性;*p* 值越小,参数被偶然指定为敏感参数的机会越小。

本研究将 5 个参数进行组合,在模型率定期进行 10 次迭代模拟,每次模拟 2 000 次,将最终模拟结果作为模型最终输入参数值用于验证期的模拟。由于库区面积广大,土壤状况复杂,所以各小流域的最终

参数值有所不同,参数最终确定值为一个范围。率定结果见表 7,图 1。

率定期为 2010—2011 年,采用 2008—2009 年的数据用于模型预热,以降低误差,在具体分析计算时不予采用。验证期为 2012—2013 年,同样采用 2010—2011 年的数据进行模型预热。选用确定性系数 R^2 ,Nash 效率系数 Ens 和相对误差对模拟结果进行评估, R^2 和 Ens 越接近于 1,Re 越接近于 0,说明模型模拟结果越精确。一般以 R^2 大于 0.6,Ens 大于 0.5,Re 的绝对值小于 15% 作为模拟精度较好的评价标准。其中,Re 为负值时,表示模拟结果比实际值偏小;Re 为正值时,表示模拟结果比实际值偏大。

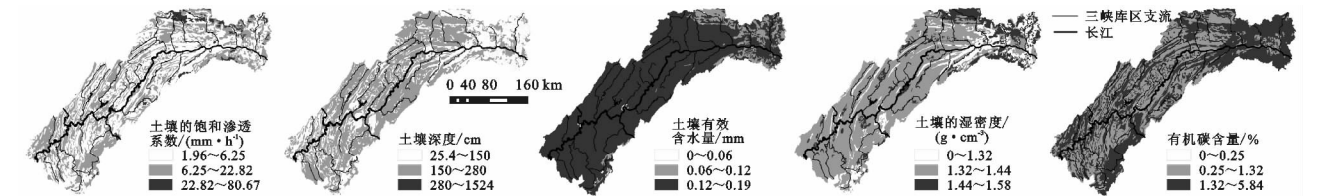


图 1 率定后 5 个敏感参数最终确定值的空间分布

表 7 参数率定最终值

参数名称	值域	初始值			最终值		
		第一层	第二层	第三层	第一层	第二层	第三层
SOL_AWC/(mm·mm ⁻¹)	0~1	0~0.2	0~0.19	0~0.17	0.12~0.18	0.13~0.17	0.12~0.17
SOL_Z/mm	0~3500	70~400	120~950	580~1660	80~220	210~950	710~1360
SOL_K/(mm·h ⁻¹)	0~2000	1.14~82.45	1.31~80.26	0.88~77.4	2.15~37.59	1.53~24.68	0.88~33.75
SOL_CBN/%	0.05~10	0.48~5.84	0.21~4.41	0~2.27	0.56~5.56	0.34~2.620	~1.01
SOL_BD/(g·cm ⁻³)	0.9~2.5	0.92~2.5	1.06~1.61	1.26~1.62	1.27~1.54	1.29~1.56	1.29~1.6

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_o - \overline{Q_o})(Q_s - \overline{Q_s}))^2}{\sum(Q_o - \overline{Q_o})^2 \sum(Q_s - \overline{Q_s})^2} \quad (9)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (10)$$

$$Re = \frac{Q_s - Q_o}{Q_o} \times 100\% \quad (11)$$

式中:Q_o表示实测值(m³/s);Q_s表示模拟值(m³/s)。

结果表明,三峡库区上游天堂岩、两河水文站;中游温泉、石柱水文站;下游巫溪、石板坪水文站的日径流量模拟值与实测值过程线总体拟合程度较好(见表 8 和图 2);率定期 6 个水文站的 R² 均在 0.73 以上,纳什效率系数 Ens 都在 0.68 以上,Re 的绝对值均在

9.9%以下。上游的天堂岩水文站受石脚盆水库影响,R² 小于 0.74,Ens 小于 0.69,Re 的绝对值为 9.847%,模拟误差相对较大;下游的巫溪水文站和石板坪水文站模拟精度较高,R² 和 Ens 均达到了 0.80 以上,Re 的绝对值均小于 4.86%;两河站、石柱站和温泉站模拟精度居中;R² 均介于 0.76~0.81 之间,Ens 均介于 0.72~0.80 之间,Re 的绝对值介于 8.01%~9.74%之间。总体呈现下游模拟精度大于中、上游的特点。验证期各站的确定性系数 R² 和纳什效率系数 Ens 均有不同程度的增大,同样是下游模拟结果优于中、上游。

表 8 径流率定和验证结果

水文站	时间尺度	子流域面积/ km ²	R ²		Ens		Re/%	
			率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
天堂岩	日	1627.97	0.739	0.800	0.689	0.785	-9.874	9.067
两河	日	1703.69	0.787	0.826	0.754	0.819	-9.734	-9.163
石柱	日	3785.58	0.765	0.828	0.726	0.796	8.010	4.437
温泉	日	5561.71	0.808	0.823	0.796	0.822	9.263	8.101
巫溪	日	4663.18	0.870	0.881	0.867	0.871	-3.099	1.898
石板坪	日	1729.11	0.826	0.862	0.802	0.850	4.853	-3.841

3 讨论与结论

3.1 讨论

结合图 3 可知,最终模拟结果显示:(1)在汛期,三峡库区下游的石板坪站和巫溪站流量峰值滞后于降雨峰值的时间比其他站长;(2)在同等降雨条件下,石板坪站和巫溪站径流量大于其他站。其原因可能有:

(1)土壤的有效含水量(SOL_AWC)与土壤的饱和渗透系数(SOL_K)的影响:土壤的有效含水量与土壤的饱和渗透系数反映了土壤蓄水能力的不同,是影响不同土壤湿度下地表产流能力的重要因素,对坡地降雨—入渗—产流过程有着重要的影响。调参过程中发现,对于同一 HRU,在经历一场强降雨后,土壤有效含水量大、饱和渗透系数小时产流较快而有

效含水量小、饱和渗透系数大时产流具有滞后性。说明含水量较小、饱和渗透系数大的土壤具有良好的蓄水与保水功能,而含水量较大、饱和渗透系数小的土壤坡面产流和降雨情况的吻合度较好。而石板坪站和巫溪站所在小流域有效含水量较大、饱和渗透系数较小(图 1),所以其流量峰值滞后于降雨峰值的时间比其他站长。

(2)土层深度(SOL_Z)的影响:降雨条件下,土层深度通过影响下渗量对产流有着显著影响。在同一 HRU 内,保持其他因素不变,仅改变土壤各层深度,发现土层深度越小,降雨转变成地表径流的比重就越大。石板坪站和巫溪站所在小流域土壤较浅(图 2),所以在同等降雨条件下,径流量大于其他站。

(3)土壤有机质含量(在 SWAT 中换算成有机碳,即 SOL_C 来进行模拟)的影响:土壤有机质是改

良土壤结构的主要成分,与产流过程密切相关^[26]。本研究在调参过程中只改变典型 HRU 内的土壤有机质含量,对比发现有机质含量越高,产流量越小,土

壤涵养水源、保水蓄水的能力就越强。石板坪站和巫溪站所在小流域上游有机质含量较低(图 2),所以在同等降雨条件下产流量大于其他区域。

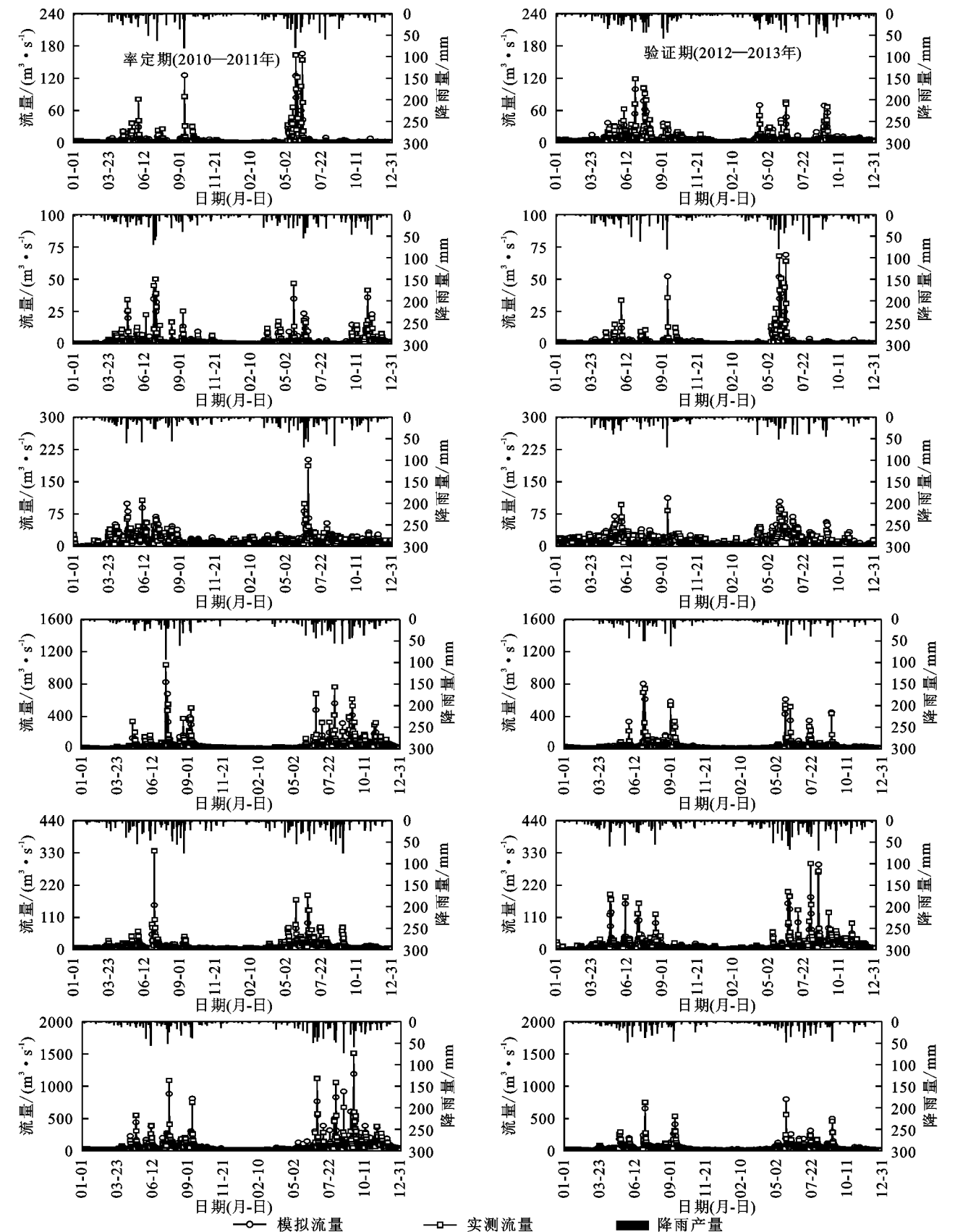


图 2 率定和验证期间日径流实测值与模拟值拟合曲线

(4) 土壤容重(SOL_BD)的影响:在土壤质地相似条件下,土壤容重大小可以反映土壤的松紧程度。数值越小,表明土壤疏松多孔,结构性良好;反之,则表明土壤紧实板硬,缺乏团粒结构^[27]。在调参过程中研究发现:在同一 HRU 内,随着容重增大,入渗率减小,径流系数变大。石板坪站和巫溪站所在小流域上游土壤容重较大(图 2),所以在同等降雨条件下,该区域产流量大于其他区域。

3.2 结论

(1) 利用 MATLAB 软件通过三次样条插值法完成了土壤粒径的转换,在此基础上运用 SPAW 软件确定了土壤水分参数;运用相关经验公式确定了土壤有机碳含量和湿土的反照率;并通过修正的通用土壤流失方程 MUSLE 确定了土壤侵蚀因子,完成了高精度土壤数据库的建立。

(2) 基于高精度土壤库的 SWAT 模型适用于三峡库区流域。全库区 6 个水文站率定期和验证期确定性系数、纳什效率系数、相对误差的绝对值的平均值分别为:0.818,0.798,6.778%,流量模拟值与实测值过程线总体拟合程度较好。

(3) 在汛期,石板坪站和巫溪站流量峰值滞后于降雨峰值的时间比其他站长;在同等降雨条件下,石板坪站和巫溪站径流量大于其他站。剖析其原因发现:在其他条件不变的情况下,SOL_AWC 越大、SOL_K 越小,产流越快;表层土层深度越小,降雨转变成地表径流的比重就越大;SOL_CBN 越高,产流量越小;在一定范围内,随着 SOL_BD 增大,径流系数变大,产流时间提早,入渗率减小。同时,本研究也存在一些不足。主要表现在径流模拟的精度有待改善,五个敏感性土壤因子对产流时间和产流量的定量影响。这些还需在今后的研究中不断完善。

参考文献:

- [1] 刘春霞,李月臣,杨华,等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报,2011,66(5):631-642.
- [2] 李月臣,刘春霞,闵婕,等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报,2013,33(1):168-178.
- [3] 沈虹,张万顺,彭虹,等. 汉江中下游非点源磷负荷对水质的影响[J]. 武汉大学学报:工学版,2011,44(1):26-31.
- [4] 张万顺,徐艳红. 基于水质目标的水环境累积风险评估模型[J]. 环境影响评价,2013(5):51-54.
- [5] 曾晨,刘艳芳,张万顺,等. 流域水生态承载力研究的起源和发展[J]. 长江流域资源与环境,2011(2):203-210.
- [6] Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold J G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current Developments and Applications[J]. Transactions of the ASABE,2010,53(5):1423-1431.
- [7] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1):79-86.
- [8] Betrie G D, Mohamed Y A, Griensven A V, et al. Sediment management modelling in Blue Nile Basin using SWAT model[J]. Hydrology & Earth System Sciences & Discussions, 2011,15(3):807-818.
- [9] Mukundan R, Radcliffe D E, Risse L M. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2010,65(2):92-104.
- [10] 魏怀斌,张占庞,杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术,2007,38(6):15-18.
- [11] 齐贞,杜丽平,刘晓冰,等. SWAT 模型中气象数据库和土壤数据库的构建方法[J]. 河南科学,2011,29(12):1458-1463.
- [12] 姜晓峰,王立,马放,等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. 中国给水排水,2014(11):135-138.
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [14] Cibir R, Sudheer K P, Chaubey I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(9):1133-1148.
- [15] Tibebe D, Bewket W. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta Watershed, Ethiopia[J]. Land Degradation & Development, 2011,22(6):551-564.
- [16] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报,2010,19(4):889-893.
- [17] 蔡永明,张科利,李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报,2003,40(4):511-517.
- [18] 谢毅文,陈晓宏,王兆礼,等. 土壤质地转换中优选插值方法研究[J]. 灌溉排水学报,2009(3):50-52.
- [19] Saxton K, Willey P. The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation[M]// Watershed Models, 2005.
- [20] Arnold J G, Kiniry G. SWAT2009 输入输出文件手册[M]. 邹松兵,译. 郑州:黄河水利出版社,2011.
- [21] Lei F, Huang C, Shen H, et al. Improving the estimation of hydrological states in the SWAT model via the ensemble Kalman smoother: Synthetic experiments for the Heihe River Basin in northwest China[J]. Advances in Water Resources, 2014,67(67):32-45.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning[G]. United States. dept. of Agriculture. Agriculture Handbook, 1978.
- [23] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(4):1549-1559.

的继续延长($T=15\sim 20$ min),溅蚀速率与团聚度由显著正相关变化到极显著正相关,两者之间相关性的动态变化可能是与表土结皮的发育有关。在降雨后期($T=15\sim 20$ min),土壤的颗粒组成对土壤的溅蚀速率影响也较大,当 $T=10$ min时,土壤颗粒粒径在 $0.02\leq D<0.2$ mm范围内的颗粒与土壤溅蚀速率相关性最大;随降雨历时延长($T=15$ min)时,土壤的溅蚀速率与土壤的 $0.2\leq D<2$ mm的颗粒含量呈显著负相关,与 $D<0.002$ mm的颗粒含量呈显著正相关;当降雨历时继续延长($T=20$ min),土壤中 $0.02\leq D<0.2$ mm的大颗粒和 $D<0.002$ mm的小颗粒与土壤的溅蚀速率呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 2版. 北京:中国林业出版社,2006:41-52.
- [2] Ellison W D. Soil Erosion Studies(Part I)[J]. Applied Engineering in Agriculture,1944,25:53-55.
- [3] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社,1997:37-38.
- [4] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持,1997(4):15-17.
- [5] 高学田,包忠谟. 降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(3):24-26.
- [6] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报,1993(6):24-29.
- [7] 胡霞. 红壤结皮发育特征及其与土壤溅蚀的关系[J]. 中国农学通报,2015,31(26):139-144.
- [8] 尹武君,王健,孟秦倩,等. 地表压实对雨滴溅蚀量的影响[J]. 节水灌溉,2010(10):26-28.
- [9] Wuddivira M N, Stone R J, Ekwue E I. Clay, organic matter, and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(1):226-232.
- [10] Savat J, Poesen J, Leuven. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I: The calculation of absolute data on detachability and transportability[J]. Catena, 1981(8):1-17.
- [11] Wan Y, El-Swaify S A, Sutherland R A. Partitioning inter-rill splash and wash dynamics: A novel laboratory approach [J]. Soil Technology, 1996(9):55-69.
- [12] 程琴娟,蔡强国. 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究[J]. 水土保持通报,2010,30(1):17-21.
- [13] 胡伟,郑粉莉,边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报,2016,36(15):4708-4717.
- [14] 宋维秀,樊萍,魏国良. 单雨滴降雨对结皮土壤溅蚀的影响[J]. 青海大学学报:自然科学版,2005,23(1):59-61.
- [15] 胡霞. 表土结皮形成过程特征以及与土壤溅蚀的关系[D]. 武汉:华中农业大学,2003.
- [16] 胡霞,严平,李顺江,等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J]. 水土保持学报,2005,19(2):13-16.
- [17] 韩学坤,吴伯志,安瞳昕,贺佳. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(4):46-51.
- [18] 胡霞. 团粒结构对黄绵土溅蚀速率和结皮形成的影响研究[J]. 中国农学通报,2015,31(27):229-235.
- [19] 陈安强,张丹,熊东红,等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(5):108-113.
- [20] 邓银霞. 湖北省几种母质发育的红壤、黄棕壤的可蚀性研究[D]. 武汉:华中农业大学,1991.
- [21] Middleton H E. Properties of Soil Which Influence Soil Erosion[M]. USA:RareBooksClub, 2012:16.

(上接第52页)

- [24] Abbaspour K C, Vejdani M, Haghighat S. SWAT -CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [J]. Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability, 2007,364(3):1603-1609.
- [25] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(5):490-496.
- [26] 杨才敏. 土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):177-179.
- [27] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):10-13.