

SWAT 模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究

谢媛媛

(西安铁路职业技术学院, 西安 710014)

摘要: SWAT 模型是基于水文过程的、具有很强物理机制的流域分布式水文模型。应用 SWAT 模型, 结合 1986—2000 年罗玉沟流域实测水文资料对径流进行模拟, 并进行了模型参数敏感度分析和率正。通过敏感度分析, 辨析出影响该流域产流模拟结果精度的主要参数因子, 如径流曲线数 CN2 等。依据上述结论调整参数值, 对模型进行了率正和验证, 得出率正期的相对误差为 14.0%, R^2 为 96.1%, Nash—Sutcliffe 系数为 0.89; 验证期的相对误差为 8.8%, R^2 为 91.5%, Nash—Sutcliffe 系数为 0.82。结果表明实测流量和模拟流量的线性回归系数和模型的效率系数满足模型模拟的要求, SWAT 模型适用于该研究区域。

关键词: SWAT 模型; 参数敏感度分析; 参数率正; 罗玉沟流域

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0204-03

Study on the Sensitivity Analysis and Calibration of Parameter in SWAT Model

XIE Yuan-yuan

(Institute of Xi'an Railway Vocational & Technical, Xi'an 710014, China)

Abstract: The soil and water assessment tool (SWAT) is a physically based continuous event hydrologic model. This study carried out SWAT model to simulate the runoff with the measured data collected from Luoyugou watershed from 1986 to 2000. Based on the sensitivity analysis, the main parameters such as CN2 affecting the simulated values in the watershed were detected. The parameters were adjusted based on the above analyzed results. From the results of calibration, the relative simulated error was less than 14%; the relative coefficient and Nash-Sutcliffe coefficient were 96.1% and 0.89, respectively; and from the results of validation, the relative error was less than 8.8%, the relative coefficient and Nash-Sutcliffe coefficient were 91.5% and 0.82, respectively, which indicated that the model can simulate the runoff outputs in the study area with satisfaction.

Key words: SWAT model; sensitivity analysis; calibration; Luoyugou watershed

SWAT (soil and Water Assessment Tool) 模型是 Arnold 等^[1]于 1994 年为美国农业部开发的适用于较大流域尺度的物理分布式水文模型, 用于模拟预测复杂流域中, 土地管理对产流、产沙及非点源污染的影响。SWAT 模型的运行需要流域内的气象、土壤、地形、植被、土地利用等诸多方面的详细信息。由于引入的参数众多, 模拟过程的不确定性增加, 容易导致模拟值与观测值的吻合度不高。因此必须进行模型参数的敏感度分析, 判断出哪些因素的值对结果的影响更重要, 从而进一步了解模型行为, 然后通过参数的率正, 来提高模型的可用性。

1 研究流域概况

罗玉沟流域位于东经 105°30'—105°45', 北纬 34°34'—34°40', 是黄河中游黄土丘陵沟壑区第三副

区具有一定代表性的流域, 也是渭河一级支流——藉河的一条支沟。1983 年被黄河水利委员会列为试点小流域, 被甘肃省列为重点综合治理小流域。

罗玉沟流域呈羽状, 总面积为 72.79 km², 流域对称系数 0.9。罗玉沟主沟长 21.81 km, 主沟平均比降 2.5%, 流域平均坡度为 19°08'。罗玉沟流域土壤类型较为复杂, 大致可划分为山地褐色土类、山地灰褐土类和冲积土类。属大陆性季风气候, 多年平均降雨量为 531.1 mm, 年平均气温 10.7℃。流域地表水资源主要由降水补给, 地表河川径流总量 (包括基流) 平均为 5 823.2 km³/a。

2 基础数据处理

在 GIS 技术的支持下, 建立了罗玉沟流域空间数据库和属性数据库。空间数据库主要包括罗玉沟

流域的 1:1 万数字高程模型(DEM)、2000 年土地利用现状图、2000 年土壤类型图、流域内 9 个雨量站及 1 个气象站的分布图等;属性数据库主要包括土壤属性数据、土地利用现状属性数据、降水及气象数据等。其中降水数据采用了这 9 个雨量站 1986—2000 年的日降水数据;气象数据采用的是天水气象站 1986—2000 年的气象资料。

3 模型参数敏感度分析

3.1 模型参数敏感度分析方法

SWAT 中采用的敏感度分析方法由 Morris 于 1991 年提出,称为 Latin Hypercube One factor At a Time 简称 LH—OAT。该方法结合了 LH 采样法和 OAT 敏感度分析的优点。

LH 采样法采用分层式采样,可以更好地覆盖采样立方却只用最少的采样数。因此,LH 采样法比随机采样法要求有更高效率的输出统计估算。其采样过程如下:首先,将每个参数空间等分成 m 个,且每个值域范围出现的可能性都为 $1/m$;其次,生成参数的随机值,并确保任一值域范围仅采样一次;最后,参数随机组合,模型运行 m 次,其结果进行多元线性回归分析。

OAT 敏感度分析方法是指模型运行 $n+1$ 次以获取 n 个参数中某一特定参数的敏感度,其优点在于模型每运行一次仅一个参数存在变化。因此,该方法可以清楚地将输出结果的变化明确地归因于某一特定输入参数值的变化。其模型输出与模型因子之间的关系。表达式为:

表 2 9 个重要参数的敏感度值

各参数	径流	泥沙	有机 N	有机 P
基流 α 系数 ALPHA_BF	0.002	0.632	1.790	2.280
浅层地下水再蒸发系数 REVAPMN	0.000	0.000	0.000	0.000
土壤蒸发补偿系数 ESCO	0.042	0.312	0.957	0.893
坡度因子 SLOPE	0.006	0.852	0.848	0.813
坡长因子 SLSUBBSN	0.000	0.096	0.100	0.108
径流曲线数 CN2	0.949	13.200	10.400	9.830
土壤可利用水量 SOL_AWC	0.139	2.030	0.519	1.040
作物管理因子 USLE_C	0.000	0.000	0.000	0.000
氮下渗系数 NPERCO	0.001	0.026	0.052	0.050

自动率正结果的准确性取决于选取的目标函数。SWAT 2003 中提供了两种方法,第一种方法是求差值的平方和,表达式为:

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (X_{i, measured} - X_{i, simulated})^2 \quad (3)$$

式中: n ——观测值和模拟值的数目。SSQ 是一种最原始的优化法,它主要是让目标函数与最大值相匹配,因而忽略了与最小值的匹配。第二种方法是求给

$$I' = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (1)$$

$$I = \frac{(Y_2 - Y_1)/Y_1}{(X_2 - X_1)/X_1} \quad (2)$$

式中: I ——参数敏感度,具体含义见表 1。

表 1 敏感度取值

分类	因子值	敏感度
I	<0.05	低
II	$0.05 \sim 0.2$	中
III	$0.2 \sim 1.0$	高
IV	>1.0	很高

3.2 模型参数敏感度分析结果

通过运行 SWAT 模型,选取其中 9 个重要参数进行敏感度分析,具体结果见表 2。结果表明径流曲线数 CN2 在各方面的敏感度值为最高。

4 模型参数率正

4.1 模型参数率正的方法

SWAT 中参数自动率正是基于美国亚利桑那州大学研发的一种 Shuffled Complex Evolution 数学算法(SCE—UA)。SCE—UA 被广泛应用于水文模型的参数率正和其他方面,如土壤侵蚀、地下水、遥感和地表模型中。这种方法通常被认为是最高效的。SCE—UA 已经被成功的运用于 SWAT 模型中的水文因子以及水质因子等的率正^[2]。Hapuarachchi^[3]等成功地运用 SCE 方法对新安江模型进行了参数率正,取得了很好的效果。Ann^[4]应用 SCE 方法对 ESWAT 模型进行参数优化,取得较好的模拟结果,使调整 ESWAT 模型参数所需时间大大减少。

定变化范围后的观测值和模拟值的平方和:

$$SSQR = \sum_{j=1}^n (X_{j, measured} - X_{j, simulated})^2 \quad (4)$$

式中: j ——给定的范围。当初步确定模型的结构和输入参数后,需要对模型进行参数率正和验证。

4.2 模型适用性评价

选用相对误差 R_e 、决定性系数 R^2 和 Nash—Sutcliffe 系数 E_m 评价模型的适用性。计算公式为:

$$R_e = \frac{P_t - O_t}{O_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_e ——模型模拟相对误差; P_t ——模拟值; O_t ——实测值。若 R_e 为正值, 说明模型预测或模拟值偏大; 若 R_e 为负值, 模型预测或模拟值偏小; 若 $R_e = 0$, 则说明模型模拟结果与实测值正好吻合。 R^2 可用于实测值与模拟值之间的数据吻合程度评价, $R^2 = 1$ 表示非常吻合, 当 $R^2 < 1$ 时, 其值越小反映出数据吻合程度越低。 E_{ns} 的计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (6)$$

式中: Q_m ——观测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——观测的平均值; n ——观测的次数。当 $Q_m = Q_p$ 时, $E_{ns} = 1$; 如果 E_{ns} 为负值, 说明模型模拟值比直接使用测量值的算术平均值不具有代表性。

4.3 模型参数率正与验证结果

本文选用 1986—2000 年共 15 a 的资料对罗玉沟流域月径流量进行参数率正和验证(图 1—2)。通过调整参数使径流模拟值与实测值吻合, 要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%, 月均值的线性回归系数 $R^2 > 0.6$, 且 $E_{ns} > 0.5$ 。

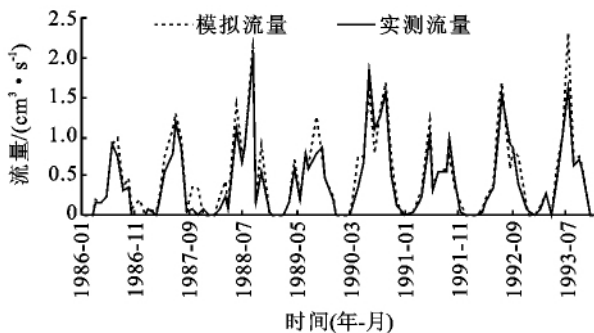


图 1 率正期月流量模拟值与实测值的比较

率正期的相对误差为 14.0%, 决定系数为 96.1%, Nash—Suttcliffe 系数为 0.89; 验证期的相对误差为 8.8%, 决定系数为 91.5%, Nash—Suttcliffe

系数为 0.82。结果表明, SWAT 模型在罗玉沟流域进行产流模拟的适用性较好。

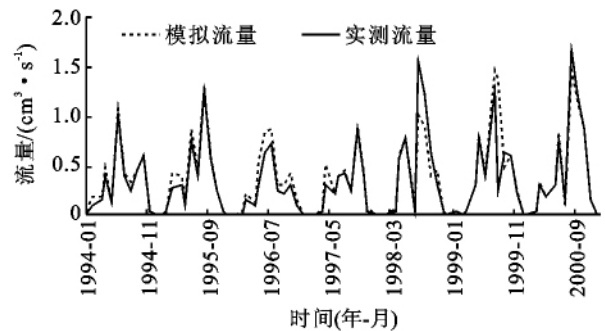


图 2 验证期月流量模拟值与实测值的比较

5 结论

应用 SWAT 模型对黄土高原地区典型流域——罗玉沟流域进行水文过程模拟, 初步探索了 SWAT 模型在该地区的适用性。通过采用连续 15 a 的实测数据对模型参数进行了敏感度分析, 发现径流曲线数 CN2 在产流产沙等方面的敏感度均最大。再通过对模型参数的自动率正, 并经验证后发现, 实测流量和模拟流量的线性回归系数和模型的效率系数满足 SWAT 模型模拟的要求, 表明模型的模拟结果较好, 可在该地区进一步推广应用。

参考文献:

- [1] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 121(2): 171-183.
- [2] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(1/2): 103-109.
- [3] Hapuarachchi H A P, 李致家, 王寿辉. SCE-UA 方法在新安江模型参数优化中的应用 [J]. 湖泊科学, 2004, 12(4): 304-314.
- [4] Ann van Griensven. Developments Towards Integrated Water Quality Modeling for River Basins [D]. Brussel: Vrije Universiteit, 2002.