DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.27

SWAT 和 WetSpa Extension 在罗玉沟流域的应用比较

韩旖旎,牛健植,张由松

(北京林业大学 水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083)

摘 要:近年来,运用水文模型来研究流域水文状况越来越普遍,本文以黄土高原丘陵沟壑区第三副区的典型小流 域为例,基于 SWAT 和 WetSpa Extension 两个模型,从模型的输入数据、模型的参数和模型模拟结果等方面进行比 较,以期为该区水沙模拟选择合适水文模型并为将来模型性能的改进提供参考。连续 15 年的校准验证表明:两个 模型都能得到较好的结果,而 SWAT 模型能应用于水文及泥沙等模拟过程,相对来说功能更全面;WetSpa Extension 模型目前仅能提供水文模拟的模块,优点在于模拟时间步长较任意,可进行洪水模拟。

关键词: SWAT 模型; WetSpa Extension 模型; 分布式模型; 罗玉沟流域; 水文模拟

中图分类号:P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)03-0133-05

Comparison of application of SWAT and WetSpa Extension in Luoyugou watershed

HAN Yini, NIU Jianzhi, ZHANG Yousong

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, it becomes more and more common to study the watershed hydrological conditions by use of hydrological model. The paper took the typical watershed of the third subplot of loess plateau hilly and gully region as example based on SWAT and WetSpa Extension model. It also explore the applicability of the two hydrological models in this area by comparing the input data, parameter, and simulation results of the two hydrological models, in order to select suitable hydrological model in the area and provide reference for the improvement of model performance in the future. The calibration and validation for 15 consecutive years indicated that the two models can get better result, but SWAT model can apply in the simulation process of hydrology and sediment, and has a comprehensive function; WetSpa Extension model can only provide the module of hydrological simulation, it has the advantage of random simulation time step and can simulate flood.

Key words: SWAT model; WetSpa Extension model; distributed model; Luoyugou watershed; hydrologic simulation

水文模型是对自然界水文现象的一种概化和模 拟与近似表达的方法。1984年,由法国、英国和丹 麦3个国家的科学家提出的SHE(System Hydrologique European,欧洲水文系统)模型是一个 典型的具有物理基础的分布式水文模型,它被认为 是最早的分布式水文模型的代表^[1-3]。此模型于 1976年在 Freeze 和 Harlan 提出的思想指导下开发 完成^[4]。

从 SHE 模型开始,包括 WetSpa 在内的大量分

布式水文模型被建立并应用于水文研究^[5],相较于 国际水文界,在我国,无论是分布式水文模型的研制 还是应用起步都比较晚。沈晓东等^[6]、黄平等^[7]、 任立良等^[8]基于中国环境现状构建了很多分布式 水文模型。2003年,刘昌明等将 SWAT 模型应用于 黄河河源区,研究径流对气候和土地利用变化的响 应^[9]。

像 WetSpa 这样的分布式水文模型大都基于一 定的物理参数,一方面解决了对缺乏资料地区的水 文模拟及预测,能够有效反映流域下垫面及气象条件的变化,另一方面很多问题都有待解决,如过参数 化、对输入数据要求高、计算负担大、结果难以验证 等^[10]。而 SWAT 模型是一个典型的准物理性水文 模型,该模型虽然在物理性和计算效率之间取得了 平衡,却在很大程度上丧失了其物理性,模型参数不 再具有原有的物理含义,其参数有效性有待深入研 究。鉴于这些差异,用户有必要在计算效率的和参 数有效性之间找到折中点。而目前并不存在一个选 择任何一种模型的客观标准。

近年来,很多学者致力于对黄土高原土地利用、 植被覆盖及水土流失的研究。黄土高原丘陵沟壑区 第三副区水土流失较为严重,多种方法被应用于有 关植被覆盖和土地利用对水土流失影响机理的研究 中。本文选取最典型的两种,通过对比 SWAT 模型 与 WetSpa Extension 模型的水文模拟模块在研究区 的适用性,为今后该区域的水土流失机理研究及水 文模型的选择提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

罗玉沟流域位于甘肃省天水市,是黄土高原丘 陵沟壑区第三副区的典型小流域。罗玉沟流域位于 东经105°30′~105°45′、北纬34°34′~34°40′。该流 域总面积72.79 km²,呈羽状,对称系数0.9,分水岭 发展系数1.49。

1.2 模型简介

1.2.1 SWAT 模型简介 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部农业研究局的 Arnold J G博士于1994年开发的^[11]。SWAT 模型是 本世纪以来发展较为成熟的基于物理过程的分布式 水文模型。它集成了地理信息系统(GIS)技术和遥 感(RS),操作界面友好,能够模拟缺失数据,国内外 众多学者已将其应用于不同区域的水文泥沙、面源 污染等方面的研究。模型主要用于模拟长期的土地 管理措施对有多种土壤类型、土地利用和管理条件 的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物质流 失的影响。也可通过调整模型输入数据(如设置不 同的气候情景或土地利用),进行情景设计与分析, 以模拟未知土地利用/植被覆盖及气候条件对泥沙、 径流和污染负荷的影响^[12-13],为生态功能的修复和 流域管理措施的布置提供科学依据。

1.2.2 WetSpa Extension 模型简介 1996 年,比利 时布鲁塞尔自由大学(Vrije Universiteit Brussel)的

Wang、Kovar 等提出了 WetSpa 模型^[14-15]。该模型 以日为时间步长,是主要模拟流域内水文状况的分 布式物理水文模型。De Smedt 和 Liu 在 WetSpa 模 型的基础上提出并研制了 WetSpa Extension 模型, 随后将其应用于洪水预测^[16]。WetSpa Extension 模 型是一个基于 GIS 技术的流域尺度的分布式物理水 文模型,该模型不仅能模拟计算不同时间步长下流 域出口的水量平衡及洪水过程,还能动态反映流域 内任一时刻任一点的径流过程。开发该模型的目 的,不仅仅是用于预报洪水,更重要的是从机理上认 识径流形成过程,特别是径流过程对地形、土壤类型 及土地利用 3 种因素的空间变异的响应。

2 两个模型输入数据库的对比

2.1 SWAT 模型的输入数据库

2.1.1 SWAT 模型属性输入数据库

(1)土壤属性数据库。SWAT 模型用到了大量 的土壤物理化学属性参数,天水水土保持试验站提 供了 SWAT 模型所需要的主要土壤物理化学参数 数据,同时参阅《中国土壤》和《甘肃土壤》进行补充 确定。

(2)土地利用(植被覆盖)属性数据库。本研究 中土地利用(植被覆盖)属性数据库使用 SWAT 模 型中自带的土地利用(植被覆盖)属性数据库。

(3)气象资料数据库。SWAT 模型需要的气象 资料主要包括降水、气温、风速、太阳辐射以及相对 湿度等数据,主要的输入数据及其信息见表1。

表1 SWAT 模型主要输入属性数据库

非空间数据	文件格式	详细信息
降水数据	DBF	罗玉沟流域9个观测站日观测数据
		天水气象站 1961 - 2000 年日观测数据
相对湿度数据	DBF	天水气象站 1961 - 2000 年日观测数据
风速数据	DBF	天水气象站 1961 – 2000 年日观测数据
气温数据	DBF	天水气象站 1961 – 2000 年日观测数据
太阳辐射数据		无观测数据,用SWAT 天气发生器模拟

2.1.2 SWAT 模型的空间输入数据库 空间数据 的格式有栅格数据和矢量数据。空间数据主要包括 地形数据、土壤类型数据和土地利用数据(图1)。 地形数据目前主要用的是网上获得的数字高程模型 (DEM)和等高线。详见表2。

2.2 WetSpa Extension 模型的输入数据库

WetSpa Extension 模型的输入数据库也主要包括空间数据库和属性数据库。所需基本数据有模型参数、气象资料、初始条件及用于率定模型参数的流

量资料。

2.2.1 WetSpa Extension 模型属性输入数据库

(1)土壤质地数据库:土壤风蚀模式、大气和陆 面过程模式、地表土壤水文学等研究都使用美国农 业部的土壤质地分类方式^[17-18]。

(2)土地利用数据库: WetSpa Extension 模型将 土地利用划分为17种类型,并对各类土地利用特征 进行了量化,包括拦截能力(最大和最小)、根深、曼 宁系数、生长系数和叶面积指数等。

(3)气象资料包括降雨及潜在蒸散发数据

(PET)资料。气温资料在模型模拟计算降雪及融雪的过程中,气温资料也是必需的。若采用 Penman – Monteith 公式计算 PET,则还需温度、热辐射、相对湿度、风速等资料。

(4)流量数据:为了对模型进行校准和验证,与 输入的降雨数据相同时间步长的流域出口流量观测 数据是必需的。

2.2.2 WetSpa Extension 模型空间输入数据库 空间数据主要包括地形数据、土壤类型数据和土地利用数据,有矢量数据和栅格数据两种格式。

表 2 两模型主要输入空间数据库比较

空间数据	文件格式	SWAT	WetSpa Extension
数字高程模型(DEM)	GRID	30×30 m 栅格	30×30 m 栅格
土地利用图	GRID	30×30 m 栅格,分7 类	30×30 m 栅格,分11 类
土壤类型图	GRID	30×30 m 栅格,分11 类	30×30 m 栅格,分7 类



图 1 研究区 DEM、土壤类型和土地利用图

3 结果分析

3.1 评价指标选择

本研究选择 Nash – Suttcliffe 系数 *Ens*、相对误 差 *Re* 和相关系数 *R*² 评价 SWAT 模型和 WetSpa Extension 模型的适用性。

(1) Nash – Suttcliffe 系数(确定性系数) Ens 的 计算公式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_m - Q_{avg})^2}$$
(1)

式中: Q_m 为观测值; Q_p 为模拟值; Q_{avg} 为观测平均 值; n 为观测的次数。

其值不大于1,越接近1模拟效果越好,当 $Q_m = Q_p$ 时,*Ens* = 1,模拟效果最好;若 *Ens* 为负值,则表明模型模拟值还不如直接使用测量值的算术平均值 有代表性。

(2) 相对误差 Re 的计算公式为:

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{oi}}$$
(2)

式中:*Re* 为相对误差; *Q_{si}* 为第*i* 次模拟值; *Q_{si}* 为第 *i* 次观测值; *n* 为观测次数。

*Re*的值越接近于0,模拟值与观测值的平均偏差越小,*Re*值为0时模拟效果最好。

(3)相关系数 R² 可以通过 Excel 的数据分析功 能获得,用来评价模拟值和观测值的相似程度,R² ≤1,其值越接近于1,表示模拟值越接近于观测值, 模拟的效果越好。

模型模拟结果的评价一般要求模型的模拟值与 观测值之间的相对误差 Re 小于 15%, 年均值的相关 系数 $R^2 > 0.6$ 且确定性系数 Ens > 0.5。

 3.2 SWAT 和 WetSpa Extension 模型的水文响应对 比分析

本研究选取数据较详尽的 2001 年土地利用及

土壤类型图作为基础输入数据,利用 SWAT 模型和 WetSpa Extension 模型对罗玉沟流域 1986-2000 年 流域出口的水文情况进行模拟,两模型校准和验证 的结果如图 2。其中 1986-1994 年为模型校准期, 1995-2000 年为模型验证期。两模型模拟结果的 评价见表 3。

从模型模拟结果评价要求来看,SWAT 模型和 WetSpa Extension 模型在该流域的模拟完全符合要 求。对 SWAT 模型而言,其校准期确定性系数为 0.88,相对误差为5.10%,相关系数为0.94;其验证 期确定性系数为0.87,相对误差为7.20%,相关系 数为0.98。对 WetSpa Extension 模型而言,其校准 期确定性系数为0.87,相对误差为1.90%,相关系 数为 0.95;其验证期确定性系数为 0.85,相对误差 为 14.96%,相关系数为 0.99。从水文模拟结果可 以看出,两模型在罗玉沟流域的水文模拟上均具有 较好的适用性。



图 2 SWAT 和 WetSpa Extension 模型模拟结果

表 3 SWAT 和 WetSpa Extension 模型模拟结果评价指标比较

 m^3/s , %

n-+ #0	年均值		Ens		Re		R^2	R^2	
∩册 □	观测	SWAT 模拟值	WetSpa 模拟值	SWAT	WetSpa	SWAT	WetSpa	SWAT	WetSpa
校准期	0.105	0.11	0.107	0.88	0.87	5.10	1.90	0.94	0.95
验证期	0.019	0.02	0.022	0.87	0.85	7.20	14.96	0.98	0.99

3.3 SWAT 模型模拟罗玉沟流域土壤侵蚀研究

本文用 SWAT 模型对罗玉沟流域的土壤侵蚀 进行了研究,利用所收集数据模拟了 1986 - 2000 年 该流域出口泥沙量,模拟结果见图 3。其中 1986 -1994 年为模型的校准期,1995 - 2000 年为验证期。 从模拟结果的评价指标可以看出模拟结果能够接 受。在校准期 *Ens* 达到了 0.88, *Re* 为 -9.87%, *R*² 为 0.95。在验证期 *Ens* 达到了 0.87, *Re* 为 -4.09%, *R*² 为 0.98,详见表 4。



图 3 罗玉沟流域 SWAT 模型泥沙模拟结果

表 4 罗玉沟流域 SWAT 模型泥沙模拟结果评价指标表

万 t, %

n-1-110	年均值		E	р.	D ²
的别	观测值	模拟值	Ens	ке	ĸ
校准期	46.55	41.96	0.88	-9.87	0.95
验证期	17.83	17.10	0.87	-4.09	0.98

表 5 从模型类型、模型应用流域的大小、应用领 域时间尺度、模型参数个数以及模型的操作性等方 面对 SWAT 模型与 WetSpa Extension 模型进行了对 比,经过以上对比分析可知两个模型在该研究区经 过数据库的本地化后均有较好的适用性。模型的选 择需要根据研究的目标进行选择,针对不同模拟需 求及研究区现状可选择相应模型。

表 5 SWAT 模型和 WetSpa Extension 模型的比较

比较项目	SWAT 模型	WetSpa extension 模型
模型类型	半分布式	全分布式
应用流域尺度	大中型流域较多,小流 域也有应用	尺度较任意
时间尺度	长时段较优	尺度较任意
应用领域	水文、泥沙运移等模拟	水文过程模拟
用到模型参数	33 个	11 个
操作性	用户交互界面较好	用户交互相对较弱

4 结 语

(1)SWAT 模型与 WetSpa Extension 模型输入 数据类型基本相同,主要包括土地利用图、土壤分布 图、数字高程模型以及降雨、温度、风速等气象观测 数据以及流域径流观测数据。但是两个模型的属性 数据库是有着各自的体系的,在使用的过程中需要 仔细对照说明文档收集数据。 (2)SWAT 模型由于模拟的模块较多,可对水 文、泥沙运移等进行模拟分析,而 WetSpa Extension 模型目前仅能进行水文过程的模拟。

(3)在获得研究区土壤和植被覆盖方面的数据 后,SWAT与WetSpa Extension两模型在黄土高原丘 陵沟壑区第三副区均具有较好的适用性。在研究区 1986至2000年流域出口径流模拟上,两个模型都 能满足模型应用的标准。SWAT模型偏向于长时段 的模拟,不适于模拟短时段以及某一洪水过程的模 拟,但SWAT模型除了应用于流域长时段水文模拟 中,还可进行泥沙模拟,因而从实际操作性来讲更适 合黄土高原地区水沙模拟。

WetSpa Extension 模型侧重于水文方面的模拟, 仅对流域的水文现象进行模拟。但WetSpa Extension 模型在原WetSpa 模型基础上增加了洪水模拟功能, 更适于短时间步长以及某一次洪水过程的模拟。

参考文献:

- [1] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen," SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system
 [J]. Journal of hydrology, 1986,87(1): 45 59.
- [2] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the european hydrological system-systeme hydrologique europeen, "SHE", 2: Structure of a physically - based, distributed modelling system [J]. Journal of hydrology, 1986,87(1):61-77.
- [3] Børge S. Experience with field testings of SHE on research catchments [J]. Nordic hydrology, 1984,15(4-5):283 294.
- [4] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint of a physically based digitally – simulated hydrological response model[J]. Journal of Hydrology, 1969,9(3):237 – 258.
- [5] Bowles D S, O'Connell P E. Recent advances in the modeling of hydrologic system[M]. Netherlands: Kluwer Aca-

demic Publishers, 1991.

- [6] 沈晓东,王腊春,谢顺平.基于栅格数据的流域降雨径 流模型[J].地理学报,1995,50(3):264-271.
- [7] 黄平,赵吉国.森林坡地二维分布模型水文数学模型的研究[J].水文,2000,20(4):1-4.
- [8] 任立良,刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[J]. 地理研究, 2000, 19(4): 369-376.
- [9] 刘昌明,李道峰,田英,等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5):437-445.
- [10] 胡和平,田富强.物理性流域水文模型研究新进展[J]. 水利学报,2007,38(5):511-517.
- [11] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development [J]. Journal of the American Water Resource Association, 1998, 34(1): 73 – 89.
- [12]姚苏红,朱仲元,张圣微,等. 基于 SWAT 模型的内蒙 古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013,27(1):175-180.
- [13]梁小军,江洪,王可,等.基于SWAT模型的岷江上游 干旱河谷区水文特征情景模拟研究[J].干旱区资源 与环境,2010,24(8):79-84.
- [14] Wang Z M, Batelaan O, De Smedt F. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1996, 21(3): 189 – 193.
- [15] Kovar K, Nachtnebel H P. Application of geographic information systems in hydrology and water resources management[C] //. Proceedings of the hydro GIS 96 conference held in vienna, Austria, 1996. 4.
- [16] De Smedt F, Liu Y B, Gebremeskel S. Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information [J]. Risk Analysis II, 2000, 295: 304.
- [17] 蔡其发,张立凤,张 铭. 中期数值天气预报的集合预报 试验[J]. 气候与环境研究,1999,4(4):365-374.
- [18] Shao Yaping. Physics and modelling of wind erosion[M]. Springer-Verlag, New York, 2008.