

简化 SWAT 模型模拟漓江支流 小流域的适用性评价

杨丽雅^{1a,2}, 夏源^{1a}, 蔡雪峰^{1a}, 张芹^{1b}, 张亚倩^{1c}

(1. 桂林理工大学 a. 环境科学与工程学院; b. 土木与建筑工程学院;

c. 地球科学学院, 广西 桂林 541006; 2. 淮海大学 文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要: 以漓江支流某小流域作为非点源污染流域研究对象,应用简化的 SWAT 模型,模拟示范区流域非点源污染的负荷量。通过对 SWAT 模型的简化,建立适用于漓江支流小流域的非点源污染模型,并对模型的适用性做出评价,得出月均值相对误差 Re 均小于 25%,月相关系数 R^2 均大于 0.7,月效率系数 E_{ns} 均大于 0.5,拟合效果良好。本文研究结果表明,在漓江支流小流域建立简化的 SWAT 模型,对该流域进行非点源污染模拟是可行的。

关键词: SWAT 模型; 非点源污染; 污染负荷; 河流污染; 漓江支流

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0101-04

Applicability evaluation of simulating small watershed of tributary in Lijiang River by simplified SWAT model

YANG Liya^{1a,2}, XIA Yuan^{1a}, CAI Xuefeng^{1a}, ZHANG Qin^{1b}, ZHANG Yaqian^{1c}

(1. a. College of Environmental Science and Engineering; b. College of Civil Engineering and Architecture; c. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Wen Tian College, Hohai University, Maanshan 243031, China)

Abstract: Taking a small watershed of tributaries in Lijiang River as the research object of non-point source pollution, the paper used simplified SWAT model to simulate the loading of non-point source pollution in the demonstration area. By simplifying SWAT model, it established non-point source pollution model which applied to small watershed tributaries in Lijiang River, and evaluated the applicability of the model and got the conclusion that the relative error (Re) is less than 25%, the correlation coefficient (R^2) is larger than 0.7 and Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (E_{ns}) is larger than 0.5. The fitting effect is good. The result indicates that it is feasible to establish the simplified SWAT model in watershed of tributaries in Lijiang River for simulating the non-point source pollution.

Key words: SWAT model; non-point source pollution; pollution loading; river pollution; tributary of Lijiang River

1 研究背景

1994 年美国农业部农业研究所 Jeff Amond 博士研发了流域尺度模型 Soil and Water Assessment Tool, 简称 SWAT 模型^[1]。该模型最早是用于研究较大流域中土壤类型、土地利用和管理措施对水分、泥沙和化学物质的长期影响规律。近些年来得到了

快速的发展和应用,主要应用于模拟水体水质、水量、泥沙、土壤、水文等内容^[2]。SWAT 模型可根据研究目的决定其研究内容,选择建立不同的数据库。建立 SWAT 模型所需的数据主要包括地形数据、土壤数据、土地利用数据、气象数据、水文数据、营养成分数据等^[3]。

目前漓江流域农村的水环境污染状况不容乐观,

收稿日期:2015-06-11; 修回日期:2015-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41302197);国家科技支撑计划(2012BAC26B00);广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019211、2014GXNSFBA118236、2012GXNSFGA060001)

作者简介:杨丽雅(1990-),女,河北张家口人,硕士,研究方向为地下水科学与工程。

通讯作者:夏源(1982-),男,贵州遵义人,副教授,从事地下水数值模拟方面研究。

农村水环境的恶化,已经严重影响到漓江的水质,农村非点源污染直接影响到漓江流域的生态环境以及饮用水安全^[4]。非点源污染的数值模拟,是非点源污染研究的热点与难点,本文选取漓江支流小流域,利用简化的 SWAT 模型进行非点源污染的数值模拟研究,验证其可行性,将有助于推动对非点源污染的研究,为非点源污染研究提供有力工具,具有潜在的应用价值,并且对生态文明建设有重要意义。

2 研究区概况

本文选取桂林市灵川县甘棠江支流小流域为研究对象,该小流域位于灵川县潭下镇境内,地理位置中心点坐标为北纬 25.48046°,东经 110.28693°,面积约 12 km²。流域内地势东北高,西南低,西北部

为青狮潭水库。该流域内灌溉水源主要来自于降水,汇流至甘棠江^[5]。

漓江流域属亚热带季风气候区,四季分明,雨量充沛,阳光充足,热量丰富,夏长冬短,雨热同季;土壤以红壤居多,约占流域面积的一半,土地利用类型主要以耕地和林地为主。研究区内非点源污染负荷主要是指该流域内的农业污染,其中包括农村居民生活污水、禽畜粪尿以及农药化肥的施用所产生的污染。

根据研究区水文观测站的数据来确定研究区内月均降雨量与径流量,依据灵川县志及漓江月产沙量来确定研究区内泥沙数据情况,研究区内污染负荷量来自研究区流域内水质监测数据。研究区内月均模拟数据见表 1。

表 1 研究区内月均模拟实测数据表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨量/mm	62	89	135	248	341	382	225	162	92	85	75	49
泥沙量/t	74	40.03	10.72	75.77	171.3	159.00	175.20	78.60	24.32	148.50	61.41	37.30
径流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0.66	1.55	3.06	6.78	9.83	11.20	6.02	3.95	1.65	1.42	1.10	0.24
污染负荷量/t	0.82	0.87	0.92	1.33	0.79	0.42	0.53	0.70	1.07	0.78	0.90	1.03

3 模型简化及其构建

3.1 模型的简化过程

在应用 SWAT 模型在对示范区域模拟的过程中,由于建立 SWAT 模型所需的基础资料较多,模拟的过

程相对复杂,故选取较为重要的污染物迁移过程来进行建模,忽略了其他次要过程。使得模型在对研究示范区的模拟过程中具有针对性,删繁就简大大加快了模拟的进程,减少了对基础数据的需求。简化的 SWAT 模型所需的基本资料如表 2 所示。

表 2 简化的 SWAT 所需的基本数据资料

数据类型	包含参数	获取途径
气候	每天最高、最低气温,降水量,太阳辐射,风速,相对湿度等	气象站点观测资料(资料不完善可以利用 SWAT 模型天气发生器进行模拟)
地形河道	子流域面积,子流域平均坡长及坡度,平均高程,河道长度、宽度、深度以及最高、最低点高程等	DEM 分析,现场勘测
土壤	土壤属性包括容重、导水率等,以及土壤可蚀系数,化学性质等	广西土壤类型图,野外取样及室内试验
土地利用	流域内土地利用类型	广西土地利用类型图,实地考察
农业管理措施	作物轮作时间,灌溉方式、数量,施肥种类、时间和数量,土地耕作方式以及作物种类	现场问卷调查,以及有关环保部门统计资料

由于模型模拟的区域较小,流域内径流过程较简单,所以在水文模块中简化的 SWAT 模型选用了修正的 SCS 径流曲线数值方程,简化了 Green - Ampt 入渗方程的计算,只添加了壤中流少部分的计

算过程,在计算实际蒸散量时与原始的 SWAT 模型所采用的方法一致。

在模拟过程中由于示范区域内总氮含量超标,简化的 SWAT 模型只考虑了氮一种污染物,不考虑

磷、杀虫剂和细菌污染模块的运算。通过对示范区走访调查,了解到当地的农药施用量较少,简化的 SWAT 模型在侵蚀模块中不考虑杀虫剂和细菌等的迁移过程。流域内土地利用类型中没有涉及到城市用地,所以简化后的 SWAT 模型只考虑了农村生活污染、农业污染等等,不考虑城镇用水污染、城市工业废水污染等模块^[6]。

3.2 模型的构建

简化的 SWAT 模型构建了水文模型、侵蚀模型和污染负荷模型 3 个主要模块。水文过程和侵蚀过程影响着污染物的迁移转化。污染负荷模拟过程离不开水文过程与侵蚀过程^[7]。水文模型中采用修正的 SCS 径流曲线数值方程来预测地表产流量。水文循环中陆地阶段的水量平衡方程见式(1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中: SW_t 为土壤的最终含水量,mm; SW_0 为土壤的初始含水量,mm; t 为时间,d; R_{day} 表示降水量,mm; Q_{surf} 为地表径流量,mm; E_a 为蒸腾发量,mm; W_{seep} 为存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量,mm; Q_{gw} 为地下水含量,mm。

在 SWAT 模型中利用修正的土壤流失方程来模拟计算土壤侵蚀过程,见式(2):

$$Y = 11.8(Q \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (2)$$

式中: Y 为产沙量,t; Q 为地表径流量,mm/hm²; q_{peak} 为洪峰流量,m³/s; $area_{hru}$ 为水文响应单元面积,hm²; K_{USLE} 表示土壤可侵蚀因子; C_{USLE} 表示土地覆盖和管理措施因子; P_{USLE} 表示水土保持因子; LS_{USLE} 表示地形因子; $CFRG$ 表示粗糙度因子^[8]。

4 模型适用性评价

在简化的 SWAT 模型模拟过程中,先对模型要求的水文、气象、农业管理、土地利用和土壤等参数进行调节,然后对模型输出的模拟值与实测值进行评价,在给定的评价范围内再调节模型的输入参数。循环这个过程,在保证参数取值合理的情况下,直到参数取值符合评价指标,结束调参过程。

由于整个模拟过程相对复杂,计算公式繁多,在调节过程中就必须要求部分主要参数的取值科学合理。本文选取了对模型影响相对重要的 8 个参数。其重要参数最终确定值与取值范围如表 3 所示。

在确定参数取值后,选用相对误差值 Re 、相关

系数 R^2 和 Nash - Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 来评价简化的 SWAT 模型对示范区的模拟是否合理^[9]。

表 3 重要参数取值及其范围

参数	模拟过程	取值范围	参数最终值
径流曲线数 CN	水文过程	0 ~ 100	65
土壤蒸发补偿系数 $esco$	侵蚀过程	0 ~ 1.0	0.2
土壤可侵蚀因子 K_{USLE}	侵蚀过程	0.02 ~ 0.75	0.013
植被覆盖与作物管理因子 C_{USLE}	侵蚀过程	0 ~ 1.0	0.7
水土保持因子 P_{USLE}	侵蚀过程	0 ~ 0.60	0.5
地形因子 LS_{USLE}	侵蚀过程	0 ~ 1.0	0.74
粗糙度因子 $CFRG$	侵蚀过程	0 ~ 1.0	0.35
曼宁系数 n	水文过程	0.023 ~ 0.050	0.035
残留物渗透系数 β	污染负荷过程	0.20 ~ 0.60	0.50

相对误差值、相关系数和效率系数的计算公式如下:

$$Re = \frac{Q_0 - Q_p}{Q_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - 1)(Q_{oi} - 1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - 1)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - 1)^2}} \quad (4)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2} \quad (5)$$

式中: Re 为模型相对误差值; R^2 为相关系数; E_{ns} 为效率系数; Q_0 为实测值; Q_p 为模拟值; Q_{oi} 为第 i 个月的实测值; Q_{pi} 为第 i 个月的模拟值; Q_{avg} 为实测平均值; n 为样本个数^[10]。

模型依据 3 个评价指标对模拟结果做出分析,结果见表 4。简化的 SWAT 模型通过对水文过程,泥沙侵蚀过程以及污染负荷过程的模拟得出其率定期与验证期的拟合曲线,如图 1 所示。

表 4 模型模拟结果评价表

项目	$Re / \%$		R^2		E_{ns}	
	率定值	验证值	率定值	验证值	率定值	验证值
水文过程	-21.9	-8.7	0.84	0.78	0.61	0.50
侵蚀过程	-18.1	-4.6	0.81	0.76	0.53	0.56
污染过程	1.44	-0.86	0.72	0.89	0.53	0.71

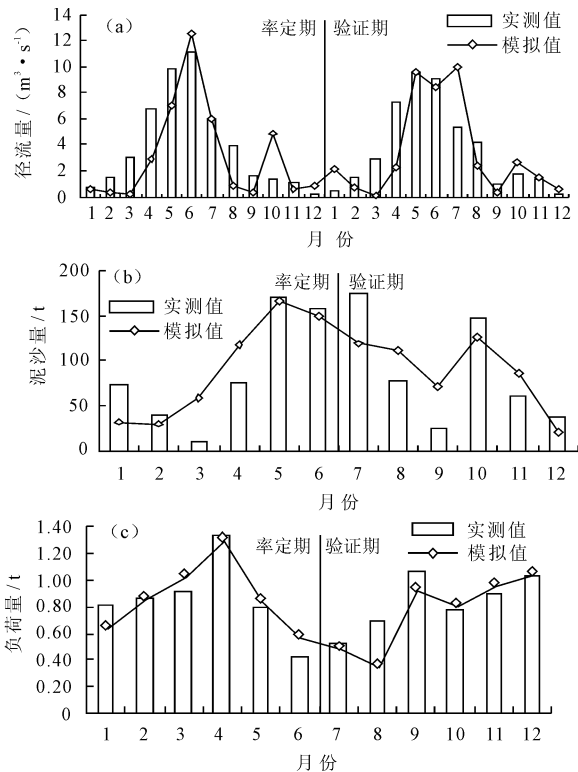


图1 率定期与验证期月实测值与模拟值拟合图

水文过程使用漓江支流小流域中2013年的降雨径流数据作为率定期的实测值,使用2014年的降雨径流数据作为验证期的实测值,通过对径流量的模拟值与实测值的校准来确定相关参数。如图1(a)所示,在率定期内,径流量的实测值略大于模拟值,4-8月期间该流域的径流量较大;模型使用2014年前半年的泥沙数据和污染负荷量作为率定期的实测值,使用2014年后半年的泥沙数据和污染负荷量作为验证期的实测值进行模拟,由图1(b)中可得出在5-7月期间,该流域泥沙量产出较大,均达到150t/月;由图1(c)中可观察得到在2014年的负荷量数据收集结果表明,污染负荷量的变化会随月份呈不规则的“W”形,6月所产生的污染负荷量最少,由此可见,降雨强度的大小以及降雨量的多少对产生的污染负荷量具有一定影响。模型在验证期内,3种过程的实测值与模拟值拟合程度较好,模型适用性较好。

5 结语

本文利用简化的SWAT模型对漓江支流小

流域进行模拟,使用较少的数据资料以较快捷简便的方式方法对漓江支流小流域进行模拟,模拟结果较为理想。

利用流域内两年的径流数据资料,一年泥沙产量数据以及一年的污染浓度数据对模型进行了校准和验证。模型适用性评价指标中,评价系数均符合要求,结果表明简化的SWAT模型适用于漓江支流小流域的非点源污染模拟。模型的建立为研究漓江流域非点源污染奠定了基础。

由于SWAT模型的模拟机理非常复杂,模型自带的数据库生成系统是以适应美国的地理信息为依据,导致模型在模拟我国流域的非点源污染等问题中存在一定的误差。简化的SWAT模型只适用于该示范区域内流域的模拟,由于时间关系,模型在后期还需要不断的改进和完善。

参考文献:

- [1] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型——理论方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [2] 秦福来. 基于SWAT模型的非点源污染模拟研究——以密云水库北部流域为例[D]. 北京,首都师范大学,2006.
- [3] 孙瑞,张雪芹. 基于SWAT模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文,2010,30(3):28-32+47.
- [4] 徐芝芬,李金城,莫德清,等. 漓江流域农村水环境污染现状及综合整治研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(12F):644-646+650.
- [5] 喻泽斌,王敦球. 漓江水环境质量现状评价[J]. 桂林工学院学报,2003,23(1):68-71.
- [6] 邓欧平,孙嗣响,吕军. 基于ArcSWAT模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J]. 环境科学,2013,34(4):1284-1290.
- [7] 郑捷,李光永,韩振中,等. 改进的SWAT模型在平原灌区的应用[J]. 水利学报,2011,42(1):88-97.
- [8] 童晓霞,崔远来,赵树君,等. 基于改进的SWAT模型农业面源污染变化规律数值模拟——以赣抚平原灌区芳溪湖小流域为例[J]. 长江科学院院报,2015,32(3):89-94.
- [9] 陈媛,郭秀锐,程水源,等. 基于SWAT模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):798-806.
- [10] 方玉杰,王金保,邓长涛,等. 基于ArcSWAT2009的锦江流域径流模拟分析[J]. 人民长江,2014,45(4):17-20.