

川中紫色丘陵区径流泥沙SWAT模型的模拟应用分析

曾 赞¹, 魏 琳²

(1. 四川农业大学信息工程技术学院, 雅安 625014; 2. 金堂县水务局, 金堂 610400)

摘要: 针对川中丘陵区紫色土坡耕地严重水土流失, 选取典型代表李子溪流域为研究区, 构建了其SWAT的模型数据库, 包括地形、土壤、气象和土地利用数据库。并利用赵家祠水文站1970–1979年的实测径流和泥沙资料, 对该流域的SWAT模型参数进行率定再采用1980–1986年的实测资料, 对模型的适用性进行验证, 同时用相对误差 R_e 和Nash确定性系数 Ens 评价模拟效果。结果显示, 径流和泥沙模拟相对误差均在 $\pm 15\%$ 范围以内, Nash确定性系数均大于等于0.70, 说明SWAT模型对李子溪流域年、月径流和年泥沙量的模拟精度较高。同时模拟值与实测值和降雨量的变化趋于一致。可见, 用SWAT模型模拟和预测雨量较为丰沛、土壤侵蚀较严重的紫色丘陵地区的产流产沙是实用、可行的。

关键词: SWAT模型; 李子溪流域; 径流模拟; 泥沙模拟; 紫色丘陵区

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00401

1 引言

以流域为单元的水沙变化规律模拟, 可分析流域的水土流失规律, 这对防治流域水土流失、制定水土保持管理措施, 以及区域的水资源可持续利用具有重要的意义。

近年来, 国内许多流域开展了SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型的应用研究, 内容涉及SWAT模型不同地区不同尺度的适宜性问题、水沙和农业污染物的非点源污染模拟, 以及土地利用/覆被类型变化和气候变化对流域的影响研究^[1-15]。它们为不同流域的径流模拟提供了有效的途径和方法。

四川丘陵地区主要为紫色土, 是四川水土流失最严重的土壤, 水土流失面积约为7.7万 km^2 , 占地区面积48%, 年流失表土3.8亿 t ^[16-17]。然而, 对川中丘陵区紫色土壤侵蚀机理和侵蚀预测预报模型的研究较少。李子溪为嘉陵江中游的一条支流, 流域地处四川盆地中部丘陵区, 气候条件和地形地貌在嘉陵江中下游地区具有代表性, 故研究李子溪流域水沙变化规律, 对于制定紫色丘陵区的水土保持管理措施奠定了基础。

影响流域产沙、输沙的2大因素为气象因素和下垫面因素^[18]。对此, 杨永德等人研究了气象因素对李子溪流域流域产、输沙的影响^[19]; 范建容等人则研究了下垫面因素对李子溪流域土壤侵蚀的影响^[20]。但综合考虑气象因素和下垫面因素共同作用下李子溪流域水土流失变化规律的研究较少, 而SWAT模型可以弥补这一不足^[21], 考虑了流域内各种水文气象因素, 鉴此, 本文对李子溪流域径流泥沙进行了SWAT模拟分析。

2 研究区与数据源分析

李子溪流域地处四川盆地中部丘陵区, 流域面积683.15 km^2 , 南北长约38 km , 东西宽约28 km ^[20]。流域的大部分行政区位于南充市嘉陵区, 其西部和南部的部分行政区划属于遂宁市的蓬溪县和广安市的武胜县。流域属四川盆地中亚热带湿润气候, 多年平均气温17.4 $^{\circ}\text{C}$, 冬暖春早, 夏季炎热, 四季分明。该流域降雨充沛, 多年平均降水量为1010.6 mm , 降水年内分配不均, 多集中在5–10月。流域地势起伏较大, 主要土壤为紫色土, 自然植被

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-02-24.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010NZ0105); 四川省教育厅科研项目(12ZB308); 四川农业大学双支计划项目。

作者简介: 曾 赞(1978–), 男, 江西新余人, 博士生, 讲师, 主要研究方向为农业水土工程。E-mail: ericazeng@163.com

稀少,多是人工栽培植物^[22]。较大的地势高差和较强的降水导致该流域水土流失严重,属中度水土流失区。因其降雨、径流、地形、土质和植被在嘉陵江中游具有一定代表性^[19,23],故本文选择李子溪流域作为研究紫色丘陵区水沙模拟的典型区域。

在模拟李子溪流域水沙过程中,需用到地形地貌、土壤、气象、植被和土地利用类型等数据,故此采集并建立了对应的地形数据库、土壤数据库、气象数据库和土地利用数据库。各数据库建立的流程如图1所示。

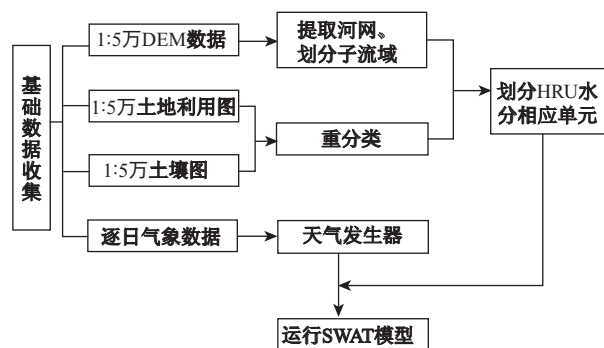


图1 SWAT模型数据库构建流程图

Fig.1 SWAT model database construction flowchart

3 丘陵区径流泥沙SWAT模型的模拟分析

3.1 模型数据的采集建库

(1)地形数据库:数字高程DEM图是SWAT模型分析的重要基础数据,也是划分子流域的基础图件。首先,利用李子溪1:5万地形图,将其扫描输入计算机,利用矢量化软件将其矢量化,并赋予高程值作为属性值,生成研究区DEM图(其分辨率为90m),见图2。然后,利用ArcGIS中的Projection工具对DEM图进行投影设置,以使SWAT模型中加载的栅格图像都具有统一的投影坐标。最后,根据DEM图提取响应单元的坡度、坡向和河网等基本信息。

(2)土地利用数据库:采用1:5万的土地利用图(分辨率与DEM一致),对原土地利用进行重分类,以符合SWAT模型模拟要求(见图3)。将土地利用图(包含有旱地、林地、草地、水域、水田、居民点和难利用地)的栅格属性值转换为SWAT模型要求的土地利用代码,转换结果见表1。

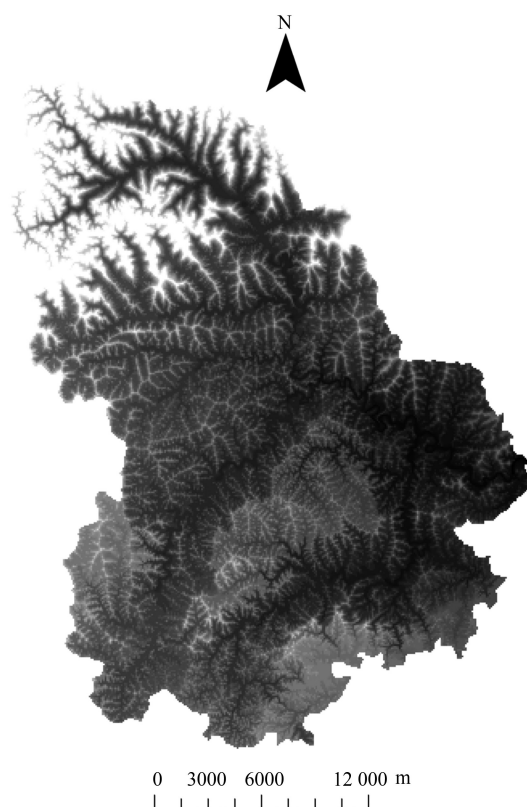


图2 李子溪流域DEM图

Fig.2 DEM of Lizixi Watershed

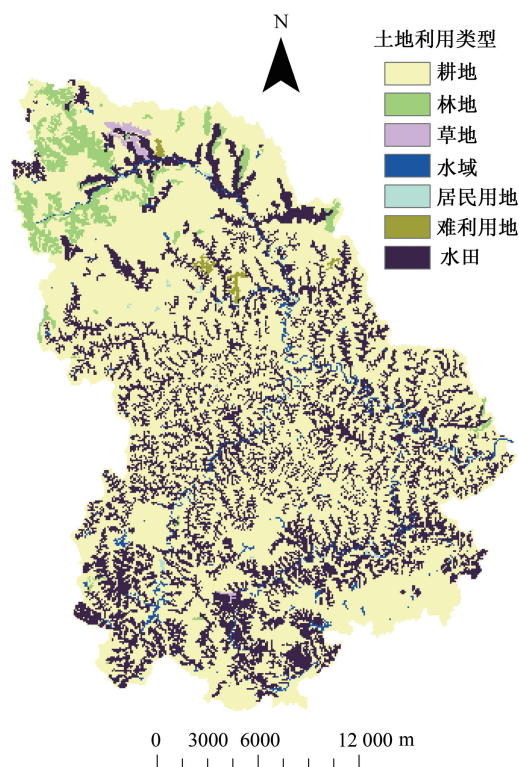


图3 李子溪流域土地利用重分类图

Fig.3 Land use types of Lizixi Watershed

表1 土地利用重分类表

Tab.1 The land use reclassification

原土地利用图代码	SWAT 模型代码	土地利用方式
1	AGRL	耕地
2	FRST	林地
3	PAST	草地
4	WATR	水域
5	URLD	居民用地
6	URBN	难利用地
7	RICE	水田

(3)土壤数据库:包括土壤分布图和土壤属性数据,作为 SWAT 模型中重要的组成参数,它对水沙模拟的结果会产生重要的影响^[2]。土壤数据包括土壤空间属性数据、土壤物理属性数据和土壤化学属性数据3大类^[24]。考虑本研究只涉及水沙模拟研究,因此,只建立土壤空间属性数据和物理属性数据。

本文采用1:5万的土壤图(分辨率与DEM一致,为90m)。见图4。根据文献[25],将本区内的土壤类型划分为3个土类,5个亚类(见表2)。

表2 主要土壤分类表

Tab.2 Reclassification of main soil types

Grid代码	土类	亚类	SWAT代码
1	黄壤	面黄泥土	huangrang
2		红棕紫泥	hongzini
3	紫色土	灰棕紫泥	huizini
4		棕紫泥	zongzini
5	冲积土	钙质紫河砂	chongjitu

土壤物理属性数据是 SWAT 模型模拟的重要数据,它控制着土壤剖面中水和气的运动,并对水循环过程具有重要作用^[26]。土壤物理属性主要参数包括:土壤剖面植被根系最大深度值、土壤表层到土壤底层深度、土壤湿密度、土壤各组成的粒径含量等。

首先,根据文献[25]查得流域各土壤的属性,由于 SWAT 模型采用美国制分类标准,而文献[25]土壤分类标准是国际标准,因此,要将土壤粒径国际标准向美国标准转换。利用数学模型进行土壤粒径转换常用的方法有线性插值法、三次样条插值法、二次样条插值法、一次样条插值法等^[28]。蔡永明的研究表明三次样条插值法计算精度相对最优^[28]。本文借

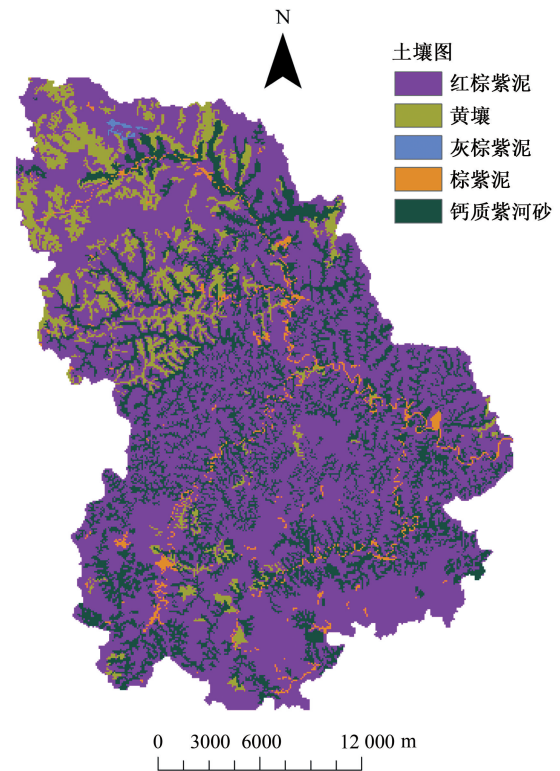


图4 李子溪流域土壤图

Fig.4 Soil types of Lizixi Watershed

助 MATLAB 软件利用三次样条插值法进行转换。粒径组成确定后,土壤物理属性主要参数基本可通过以下方法进行确定。(1)土壤剖面最大根系深度和土壤表层到土壤底层的深度可由文献[25]得到。(2)土壤中有有机碳的含量可由有机质的含量乘以0.58求的^[29],有机质的含量同样可以从文献[25]查得。(3)土壤中可利用水量和饱和水力传导系数可通过试验或使用 SPAW 软件计算得到^[30]。

(4)气象数据库:主要包括日降水量、最高最低气温、太阳辐射量、风速和相对湿度。本文的降雨量、日气温、风速和相对湿度气象数据,采用南充气象站1970-1986年的观测资料。

3.2 模型参数的率定

分布式水文模型往往引入了大量的参数来进行模拟设置^[31],然而参数的赋值通常存在空间变异性,模拟运行时使用的多为研究区内平均参数,模拟值与实测值有偏差,因此,需对模型参数进行调整校核,以适应研究区内的模拟。由于实测资料中径流量包含了地表径流和地下径流,所以,在模型校准时,采用数字滤波方法将实测资料中的基流量

分离出来。从实测原始总径流减去地表径流即为基流量。因此本文校准和验证采用的实测径流量数据均为实测原始径流减去基流量。

根据实测地表径流值,通过调整SCS径流曲线系数(CN₂)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)等参数对模拟地表径流进行校准。根据实测泥沙含量,选取USLE方程中水土保持因子(USLE_P)、耕作管理因子(USLE_C)等参数对模拟泥沙含量进行校准。

模型模拟结果主要是分析模拟值与实测值的接近程度,本文采用相对误差 R_e 和Nash确定性系数 Ens 评价模拟结果,计算公式见式(1)和式(2)^[32]。相对误差 R_e 反映模拟值与观测值的差值与实测值之间的比值;Nash确定性系数 Ens 反映模拟值与观测值的比值与1:1曲线的靠近程度。Nash确定性系数(Ens)越大,相对误差(R_e)绝对值越小,说明模拟精度越高。当Nash系数达到0.6以上,相对误差在±15%范围以内,就可以认为SWAT模型较好地模拟了研究区的水文泥沙过程。

$$\text{相对误差 } R_e: R_e = \frac{Q_m - Q_{abs}}{Q_{abs}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Nash 确定性系数: } Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{abs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{abs,i} - Q_{avg,i})^2} \quad (2)$$

式中, Q_m 为模型模拟值; Q_{abs} 为观测值; Q_{avg} 为观测值的平均值; n 为观测的次数。

3.3 模拟结果分析

3.3.1 径流模拟结果

采用李子溪流域1970–1979年实测径流量(实测原始径流量减去基流量)的年、月径流量进行校准,选用1980–1986年的实测年、月径流量进行验证。在进行月径流模拟时,选择数据较全,降雨量比较充沛的7月份进行模拟。李子溪流域年径流和月径流模拟结果分别见图5和图6。计算得到年径流模型校核期相对误差-7.91%,Nash系数0.91,验证期相对误差-11.76%,Nash系数0.7;月径流模型校核期相对误差-10.93%,Nash系数0.78,验证期相对误差2.70%,Nash系数0.84。

模拟结果表明:(1)不管在校核期还是验证期,年径流和月径流模拟值与实测值相对误差不大,均在10%左右,Nash系数在0.7以上,而且预测值与实

测值的变化趋势也基本相同,同时降雨量和径流深变化趋于一致。其表明SWAT对于李子溪流域的年径流和月径流模拟效果较好,基本反映了径流量的实际变化趋势,可以满足水资源管理的需要。(2)以17年的年均降雨量(951mm)为基准,将17年分成高于年均降雨量组(有9年)和低于年均降雨量组(有8年),分别将每组的年模拟相对误差绝对值相加取平均。结果显示,高于年均降雨量组的年均相对误差(6.25%)低于小于年均降雨量组的相对误差(16.32%)。这表明SWAT模型模拟降水丰富的年份精度较高,从图5可知,降水与径流峰值对应相对整齐。(3)原理同上,将17个月分成降雨量多组(有9个月)和降雨量少组(有8个月)。结果表明,降雨量多组的月均相对误差(25.24%)高于降雨量少组的月均相对误差(12.25%)。可见,SWAT模型对降雨量大的月份整体模拟精度要小于降雨量少的月份,这与竹磊磊^[10]、陈小凤^[33]、袁军营^[34]等人的研究相一致。可能因SWAT模型在模拟时是以日为步长,满足不了短时大强度降雨的径流模拟精度。

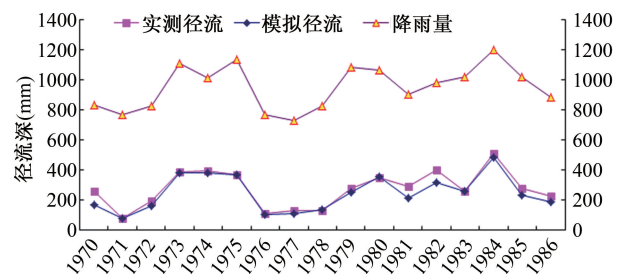


图5 李子溪流域年径流模拟结果

Fig.5 Comparison of observed and simulated annual runoff depth of Lizixi Watershed

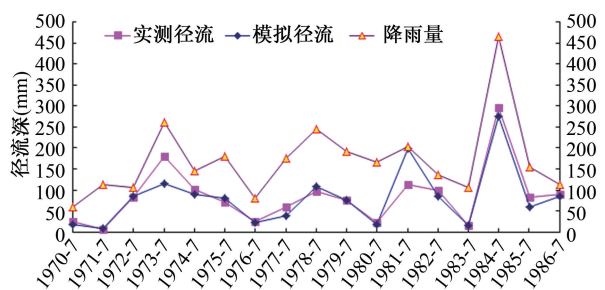


图6 李子溪流域月径流模拟结果

Fig.6 Comparison of observed and simulated monthly runoff depth of Lizixi Watershed

3.3.2 泥沙模拟结果

李子溪流域年泥沙量模拟结果,图7可知,泥沙量的模拟值与实测值和降雨量的变化趋势基本吻合。年泥沙量模拟除1979年相对误差较大外,其他年份的误差都较小。验证期的泥沙量模拟值与实测值相关系数 R^2 达0.9528,比较结果如图8所示。模型校核期相对误差-11.53%,Nash系数0.75,验证期相对误差-12.33%,Nash系数0.73。这都表明SWAT模型对泥沙的年模拟精度较好,可以用来预测年泥沙量,但泥沙模拟的精度小于径流的模拟精度。主要是由于影响产沙的因素较为复杂,除了降雨产生的径流外,还与土壤可蚀性、地面坡度坡长、植被覆盖度、土地的利用和水土保持措施等有关。从图7可以看到,泥沙量模拟值的整体都低于实测值,这与王林等人的研究结论相同^[11],但是不同的是降雨量少的年份,泥沙模拟值与实测值较为接近,降雨量多的年份泥沙模拟值与实测值反而有偏离,尤其在丰水年1973、1979、1984年偏离的更大些。当丰水年时,强降雨会使得土壤侵蚀因子、植物覆盖因子在内的下垫面参数与其他年份有较明显的差异性,而模型中这些参数采用的是年平均值。

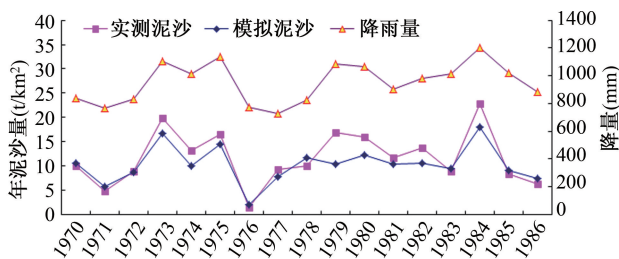


图7 李子溪流域年泥沙量模拟

Fig.7 Comparison of observed and simulated annual sediment yield of Lizixi Watershed

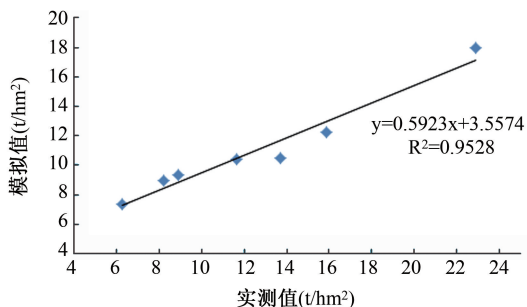


图8 验证期年泥沙量模拟值与实测值散点图

Fig.8 Simulation and observation scatter plotting of annual sediment yield in the validation period

4 结论

利用赵家祠水文站1970-1979年的实测年、月径流和年泥沙资料,对李子溪流域的SWAT模型参数进行率定、校准。根据率定后的参数,采用1980-1986年的实测资料对模型的适用性进行验证。模拟结果表明,在模型校准期和验证期相对误差均在 $\pm 15\%$ 范围以内,Nash确定性系数Ens均大于或等于0.70,且降雨和径流、泥沙变化趋于一致。说明SWAT模型对李子溪流域年、月径流和年泥沙量的模拟精度较高。并且SWAT模型在降水丰富的年份模拟精度相对较高,而在降水偏多的月份模拟精度相对要低。在年泥沙模拟过程中,模型却出现了降水较少的年份泥沙模拟精度高于降水较多的年份,而且年泥沙量模拟值的整体都低于实测值。

综上可知,对雨量较丰沛,土壤侵蚀严重的紫色丘陵地区,可利用SWAT模型对该地区进行产流产沙的模拟预测,研究其水土流失规律,为地区生态恢复、制定水土保持管理措施提供技术支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄清华,张万昌.SWAT分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用[J].南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):22-26.
- [3] 张东,张万昌,朱利,等.SWAT分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J].地理科学,2005,25(4):434-439.
- [4] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于SWAT模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例[J].生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [5] 李成六.基于SWAT模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [6] 宋艳华,马金辉.SWAT模型在陇西黄土高原地区的适用性研究[J].干旱区地理,2007,30(6):933-937.
- [7] 罗睿,徐宗学,程磊.SWAT模型在三川河流域的应用[J].水资源与工程学报,2008,19(5):28-33.
- [8] 程磊,徐宗学,罗睿,等.SWAT在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例[J].地理研究,2009,28(1):66-73.
- [9] 李晓,李致家,董佳瑞.SWAT模型在伊河上游径流模拟中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(1):23-26.
- [10] 竹磊磊,李娜,常军.SWAT模型在半湿润区径流模拟中的适用性研究[J].人民黄河,2010,32(12):59-61.
- [11] 王林,陈兴伟.基于SWAT模型的晋江西溪流域产沙模拟

- [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2008, 24(3): 93-97.
- [12] 张明旭. 晋江西流域降雨径流的 SWAT 模型模拟[D]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- [13] 唐达方, 刘薇, 王翠文. SWAT 模型在丘陵地区的非点源污染模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(11): 1267-1270.
- [14] 卢晓宁, 韩建宁, 熊东红. 基于 SWAT 模型的忠县虾子岭流域地表径流特征浅析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(11): 15-20.
- [15] 李慧, 雷晓云, 包安明, 等. 基于 SWAT 模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 686-690.
- [16] 袁再健, 蔡强国. 四川紫色土地区典型小流域分布式产汇流模型[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 36-41.
- [17] 袁再健, 蔡强国. 四川紫色土地区鹤鸣观小流域分布式侵蚀产沙模型[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 967-976.
- [18] 吴从林, 张平仓. 三峡库区王家桥小流域土壤侵蚀因子初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 165-170.
- [19] 杨永德, 郭希望, 郭芳, 等. 李子溪流域水土流失及泥沙输移规律初步研究[J]. 人民长江, 1994, 25(9): 40-43.
- [20] 范建容, 柴宗新, 刘淑珍, 等. 基于 RS 和 GIS 的四川省李子溪流域土壤侵蚀动态变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25-28.
- [21] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resource Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [22] 邓贤贵, 华国春, 黄川友. 李子溪流域泥沙流失规律及工程效益分析[J]. 四川联合大学学报, 1997, 1(6): 26-35.
- [23] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型-理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [24] 杨子生. 土壤流失方程在山区耕地可持续利用适宜性评价与土地利用规划中的应用[J]. 山地学报, 1999(17): 36-44.
- [25] 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [26] 武思宏. 晋西黄土区嵌套流域生态水文过程模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [27] Garbrecht J, Martz L W, Syed K H, *et al.* Determination of Representative Catchment Properties from Digital Elevation Models[C]. Proceedings of the 1999 International Water Resources Engineering Conference. Seattle, Washington, 1999.
- [28] 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.
- [29] 文启孝. 土壤有机质研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [30] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, *et al.* Estimating generalized soil water characteristics from texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 1031-1035.
- [31] 张丽娟, 秦富仓, 岳永杰, 等. SWAT 模型敏感性分析模块在云州水库流域的应用[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 122-126.
- [32] 孙庆艳, 余新晓, 胡淑萍, 等. 基于 SWAT 模型的半城子水库流域径流模拟[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 148-154.
- [33] 陈小凤. 基于 SWAT 模型的白莲河流域径流模拟研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 21-23.
- [34] 袁军营, 苏保林, 李卉, 等. 基于 SWAT 模型的柴河水库流域径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 361-365.

Runoff and Sediment Simulation in Purple Hilly Area Based on SWAT Model

ZENG Yun^{1*} and WEI Lin²

(1. College of Information and Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. Jintang County Water Authority, Jintang County 610400, China)

Abstract: Considering both various hydro-meteorological factors and different underlying surfaces in watersheds, a physically based and distributed hydrological model called SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was developed to predict the runoff, sediment, and agricultural chemical yields in watersheds and large river basins over long periods of time. Lizixi Watershed is a typical representative with moderate erosion in Sichuan purple hilly area. Based on the serious purple soil erosion and water loss of slope farmlands in central Sichuan hilly areas, Lizixi Watershed is chosen as the study area to analyze the law and degree of soil and water losses in pur-

ple hilly areas. Firstly, the SWAT model databases of Lizixi Watershed are constructed including the database of topography, soil, weather and land use. Then the Zhaojiaci Hydrometric Station's actual runoff and sediment data from 1970 to 1979 are used to calibrate the hydrological parameters of SWAT model, while the observed data from 1980 to 1986 are used to validate the model. The effects of simulation are evaluated by the relative error R_e and Nash determinacy coefficient Ens . The results show that the relative errors of runoff and sediment simulation are within the scope of $\pm 15\%$ and their values of Nash determinacy coefficient are equal to or greater than 0.70. The values indicate that the simulation of annual and monthly runoff and annual sediment load is of high accuracy. And the tendency of the simulation value is consistent with the corresponding measured value and changes of rainfall. So it is feasible to make use of the SWAT model to simulate and predict the runoff and sediment yields in the purple hills with abundant rainfall and serious soil erosion. The use of the model can provide a reference for preventing soil erosion and making the control measures of water and soil conservation.

Key words: SWAT model; Lizixi Watershed; runoff simulation; sediment simulation; purple hilly area

***Corresponding author:** ZENG Yun, E-mail: ericazeng@163.com