

基于 SWAT 模型的抚河流域土壤侵蚀模拟

肖军仓¹, 罗定贵², 王忠忠³

(1. 河南省环境保护科学研究院, 郑州 450004; 2. 广州大学 环境科学与工程学院, 广州 510006; 3. 广东省地质调查院, 广州 510080)

摘 要:为模拟流域土壤侵蚀状况,分析土地利用方式对土壤侵蚀的影响,构建抚河流域 SWAT 模型。应用 SWAT 模型对研究区的径流、产沙状况进行了校准和验证,在此基础上分析了抚河流域土壤侵蚀强度特征,探讨了不同土地利用方式对产沙的影响。结果表明:4 个测站月径流、月输沙量的校准期和验证期的决定系数(R^2)均在 0.7~0.93 之间,Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)在 0.64~0.92 之间,径流、泥沙模拟结果达到满意精度,模型在本区域具有良好的适用性;土壤侵蚀以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,城乡及工矿用地的土壤侵蚀模数最大,而林地的产沙量绝对量最大。研究成果可为研究区水土保持提供参考。

关键词:SWAT 模型; 土壤侵蚀; 校准; 验证; 抚河流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)01-0014-05

Soil Erosion Simulation in Fuhe Basin Based on SWAT Model

XIAO Jun-cang¹, LUO Ding-gui², WANG Zhong-zhong³

(1. He'nan Academy of Environmental Protection Research, Zhengzhou 450004, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Province Geological Survey, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to simulate the condition of soil erosion, and analyze the effect of land use on soil erosion, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model has been built for the Fuhe watershed of Jiangxi Province. SWAT model was adopted to simulate the hydrologic and soil erosion processes of the Fuhe watershed. On this basis, the characteristics of the soil erosion modulus in the Fuhe watershed were analyzed, and the effect of land use type on the sediment yield was discussed. The results showed that the determination coefficient (R^2) of the monthly flow and sediment loading for 4 observation station are between 0.7 and 0.93 in the calibration and validation period, and Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) were between 0.64 and 0.92. The simulation precision was pretty well, and the results of the runoff and sediment simulation has higher reliability. SWAT model could be successfully used for simulation in this area. Slightly-erosion and light-erosion were the main soil erosion types. The soil erosion modulus of non-agricultural land was maximal, and the sediment yield of woodland was maximal. The research results can provide reference for soil and water conservation of study area.

Key words: SWAT model; soil erosion; calibration; validation; Fuhe watershed

土壤侵蚀使土壤和养分流失、土地贫瘠、宜耕地减少;导致地表植被严重破坏,生态环境恶化;大量泥沙进入水库、河道和湖泊,造成河床淤塞、抬高,引起河流泛滥,加剧洪涝灾害的威胁;泥沙中的氮、磷营养物质还会加剧水体的富营养化,已经成为目前最为严重的环境问题之一。近年来,随着 GIS 技术和分布式水文模型的发展,为土壤侵蚀定量研究提供了有效的分析工具,SWAT 模型即为其中之一。SWAT (Soil and Water Assessment Tool)作为典型的分布

式水文模型,在世界上已得到广泛应用。如 Santhi 等^[1]对美国德克萨斯州的 West Fork 流域在执行水质管理规划(WQMPs)前后两个情景进行模拟,来评价该规划对非点源污染的长期影响。Behera 等^[2]对 Kavgari 流域的非点源污染关键区进行了识别。Srinivasan 等^[3]成功模拟了 Richland-Chambers 流域的径流和泥沙输移量,指出 SWAT 模型可以用于情景分析以检测流域的生态脆弱区,并提出减少土壤流失的最佳措施。庞靖鹏等^[4]利用 SWAT 模型分析了

收稿日期:2012-06-22

修回日期:2012-08-08

资助项目:科技部国际合作项目《鄱阳湖区水环境及生物多样性研究》(2006DFB91920);南昌大学“教育部鄱阳湖湖泊生态与生物资源利用实验室”开放基金项目

作者简介:肖军仓(1983—),男,河南郑州人,工程师,硕士,主要从事区域环境模拟及生态保护规划研究。E-mail: xiaojc@foxmail.com

通信作者:罗定贵(1965—),男,重庆人,教授,博士,主要从事流域水环境模拟研究。E-mail: ldggq@163.com

不同土地利用方式对产沙的影响,结果表明:流域内的土壤侵蚀主要发生在农田。郝芳华等^[5]利用情景模拟来分析土地利用变化对产流量和产沙量的影响,模拟结果显示:森林的存在能增加径流量,减少产沙量;草地覆被能减少产沙量;农业用地的增加将会导致产沙量增加。卢爱刚等^[6]通过对黄土高原典型区泾河流域的径流、侵蚀模数的模拟研究,对流域的径流现状和侵蚀现状进行了空间定量评价。杨巍等^[7]利用 SWAT 模型对水库汇水区产沙以及泥沙入库进行了研究,揭示了水库汇水区的水土流失规律。

抚河是鄱阳湖流域第二大水系,抚河流域为典型的农业区。研究抚河流域不同土地利用方式下的产流产沙规律,定量分析不同土地利用类型的径流和泥沙响应,探索流域的水土保持与生态恢复对策,对于抚河流域的生态保护和生态恢复,乃至对鄱阳湖流域的水环境、生态保护都有重要的参考价值,可以为区域可持续发展对策的制定提供科学依据。

本文以抚河流域为研究对象,应用 SWAT 模型对其 1999—2005 年的产流产沙进行模拟,对其土壤侵蚀强度进行分级,并分析不同土地利用方式对河道中泥沙负荷的贡献。

1 材料与方法

1.1 抚河流域概况

抚河是江西省第二大河,抚河流域地处江西省东部(图 1),位于 $115^{\circ}36'—117^{\circ}10'E$, $26^{\circ}30'—28^{\circ}20'N$,流域面积 $15\,856\text{ km}^2$,属于中亚热带湿润季风区,年均降水量 $1\,790\text{ mm}$ 。境内以丘陵山地为主,丘陵占 53.1% ,山地占 29.5% ,岗地占 10.4% ,平原只占 7.0% 。土壤以红壤、潴育型水稻土、黄红壤、酸性紫色土、黄壤等为主^[8]。林地占流域总面积的 65.93% 、水稻田占 23.46% ,是流域两种主要的土地利用类型。

1.2 SWAT 模型原理

SWAT 是美国农业部(USDA)开发的流域尺度的分布式水文模型,用于模拟预测一个大型复杂的流域内,土地管理措施对流域产流、产沙和化学污染物负荷的影响^[9]。SWAT 模型是在 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)模型^[10]基础上发展起来的,融合了 ARS 几个模型的特点。模型自开发以来,已经在北美、欧洲等地取得了广泛的应用,并在不断地进行改进。

应用 SWAT 模型前,须将流域划分成多个子流域。在流域内不同地点,对每个子流域分别预测径流,然后通过河道的汇流得到总径流。SWAT 模型采用修正的 SCS 曲线数 CN 值法对降雨量计算得到

地表径流量^[11];采用修正的通用土壤流失方程(MUSLE)来计算每个子流域的土壤侵蚀和泥沙量^[12]。

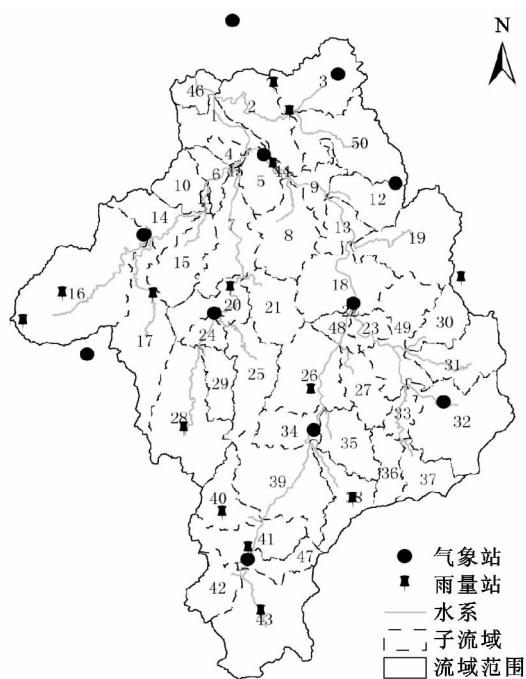


图 1 抚河河域内气象站点、雨量站点位置

1.3 模型输入数据

为了便于模型的应用,将抚河流域划分为 50 个子流域,每个子流域再进一步划分为模型所需大小的水文响应单元(HRUs),最终划分为 368 个水文响应单元。模型所需要的数据包括地形、土壤、农业土地管理和逐日气象数据。区域地形图、土壤属性数据和土地覆盖/土地利用数据均来源于江西省国土资源厅,农业土地管理数据来源于农业主管部门及实地调查复核资料。

本研究采用的水文气象数据时段为 1986—2005 年,包括 26 个雨量站(含 11 个气象站)的日降雨数据,11 个气象站的日气象数据(最高/最低气温、太阳辐射、风速、相对湿度等),4 个水文站(南城站、廖家湾站、姜家村站、李家渡站)的径流量、河道输沙量数据,1 座大型水库(洪门水库)的日出流量数据。以上数据由江西省气象局和抚州市水文局共同提供。

1.4 模型校准与验证

模拟精度的高低决定了模型在研究区的适应性。本次研究选取 3 个指标用于模型适用性评价,分别是相对误差 R_e 、决定系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数。相对误差计算公式为:

$$R_e = \frac{Q_p - Q_o}{Q_o} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_e ——模型模拟相对误差; Q_p ——模拟值; Q_o ——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,则说明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。

决定系数 R^2 在 MS-Excel 中应用线性回归法求得, R^2 也可以进一步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,则表明数据的吻合程度越低。

Nash-Suttcliffe 效率系数 NSE 的计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

式中: Q_p ——模拟值; Q_o ——实测值; \bar{Q} ——实测平均值; n ——实测数据个数。当 $Q_o = Q_p$ 时, $NSE = 1$;若 NSE 为负值,说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度低。

模型在运行初期需要将模拟初期作为模型运行的启动(Setup)阶段,以合理估计模型初始变量,然后再将数据系列分为校准和验证阶段。根据数据获取的完整性,选用 1998—2005 年间的径流进行模拟,其中 1998 年数据用作模型模拟的建立阶段,1999—2002 年作为校准阶段(Calibration),2003—2005 年作为验证阶段(Validation)。

校准 SWAT 模型中径流和泥沙负荷相关参数的步骤为:首先进行径流参数校准,若模拟值与实测值月均误差小于实测值的 20%,月决定系数 $R^2 > 0.6$,且 $NSE > 0.5$,则认为达到满意精度。其次,对泥沙负荷进行参数校准,若模拟值与实测值月均误差小于实测值的 30%,月决定系数 $R^2 > 0.6$,且 $NSE > 0.5$,

则认为达到满意精度。至此完成对径流和泥沙负荷的校准过程。在此基础上采用另外一组数据对模型进行验证,最终确定模拟参数值。

2 结果与分析

2.1 校准结果

利用南城、廖家湾、娄家村和李家渡水文站 1999—2002 年月径流实测数据和月泥沙量数据进行月尺度校准。校准期间月径流量和月泥沙量的实测值与模拟值的拟合结果分别如图 2、图 3 所示。校准统计结果见表 1。

径流:南城、廖家湾和娄家村 3 个测站校准期的相对误差都小于 $\pm 5\%$,李家渡站的相对误差较大。南城、廖家湾和娄家村 3 个测站的决定系数 R^2 分别为 0.87,0.89,0.86,李家渡站略低为 0.83;各个测站的 NSE 值都大于 0.7,其中李家渡站的 NSE 值略低,为 0.74,其余各站均大于 0.80。

泥沙:南城、廖家湾、娄家村和李家渡站校准期的相对误差都小于 $\pm 20\%$,其中娄家村站的相对误差较大。南城、廖家湾和娄家村站的决定系数 R^2 分别为 0.80,0.75 和 0.82,李家渡站略低,为 0.70;各个测站的 NSE 值都大于 0.6,其中李家渡站的 NSE 值略低,为 0.64。

2.2 验证结果

校准完成后,使用 2003—2005 年的径流和泥沙观测数据进行验证。验证期间月径流量和月泥沙量的实测值与模拟值的拟合结果分别见图 4、图 5,验证期的评价参数见表 1。

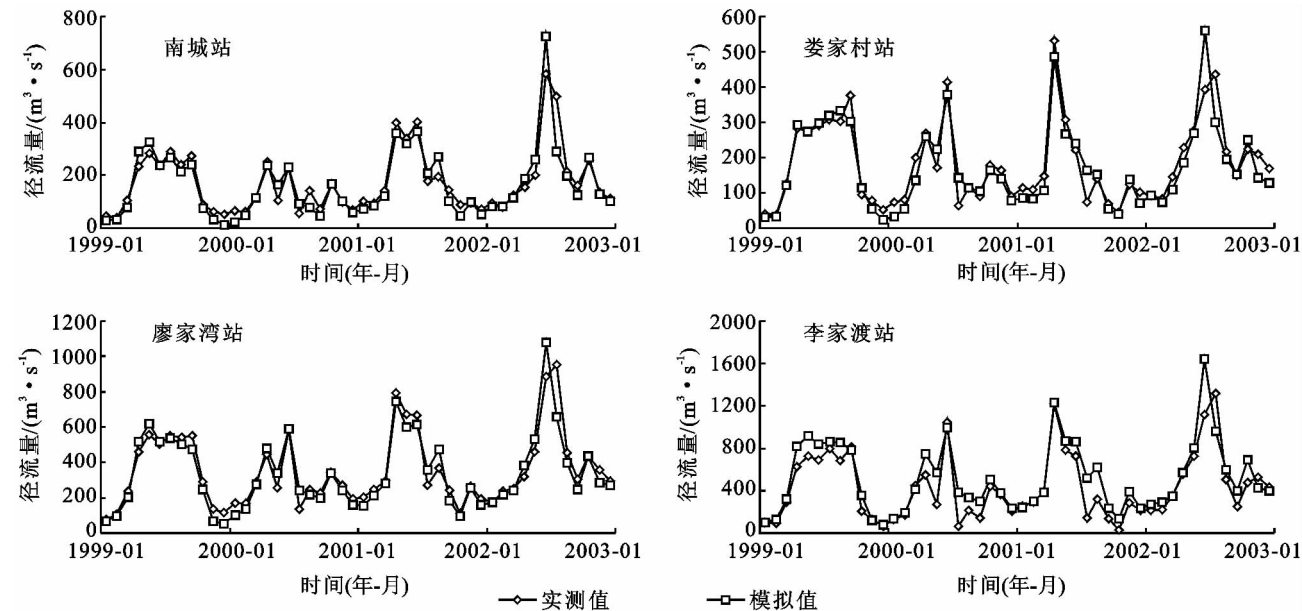


图 2 抚河流域各测站 1999—2002 年径流实测值和模拟值月拟合曲线

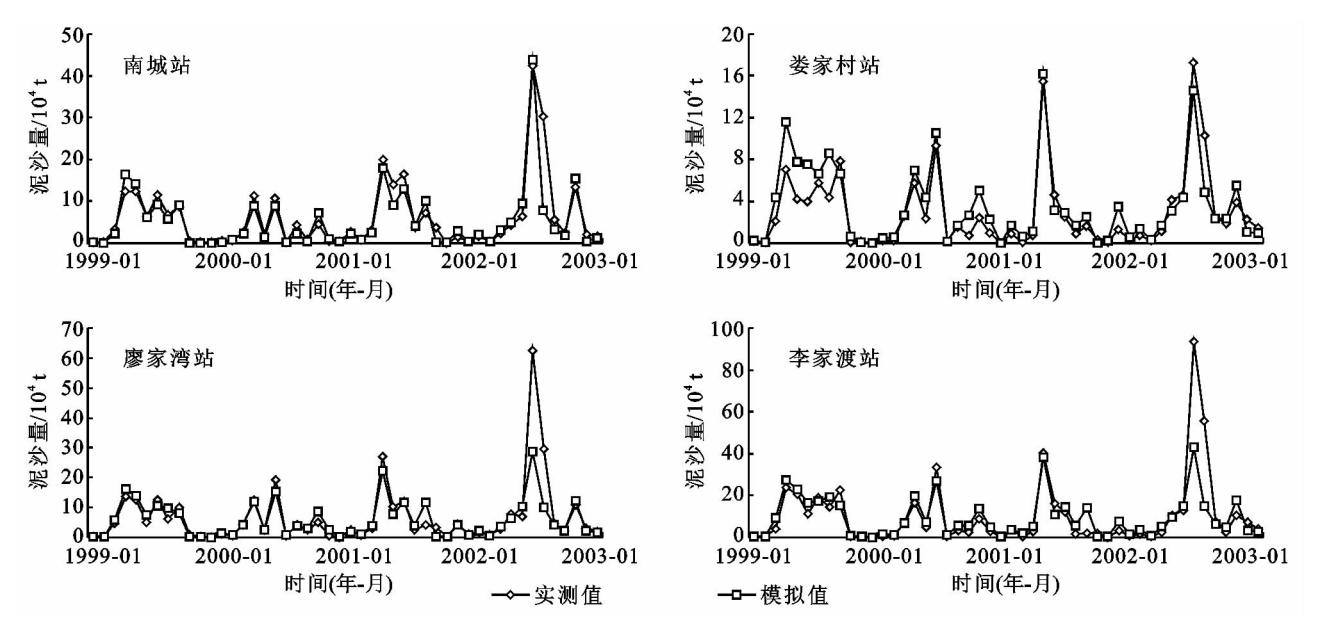


图 3 抚河流域各测站 1999—2002 年泥沙实测值和模拟值月拟合曲线

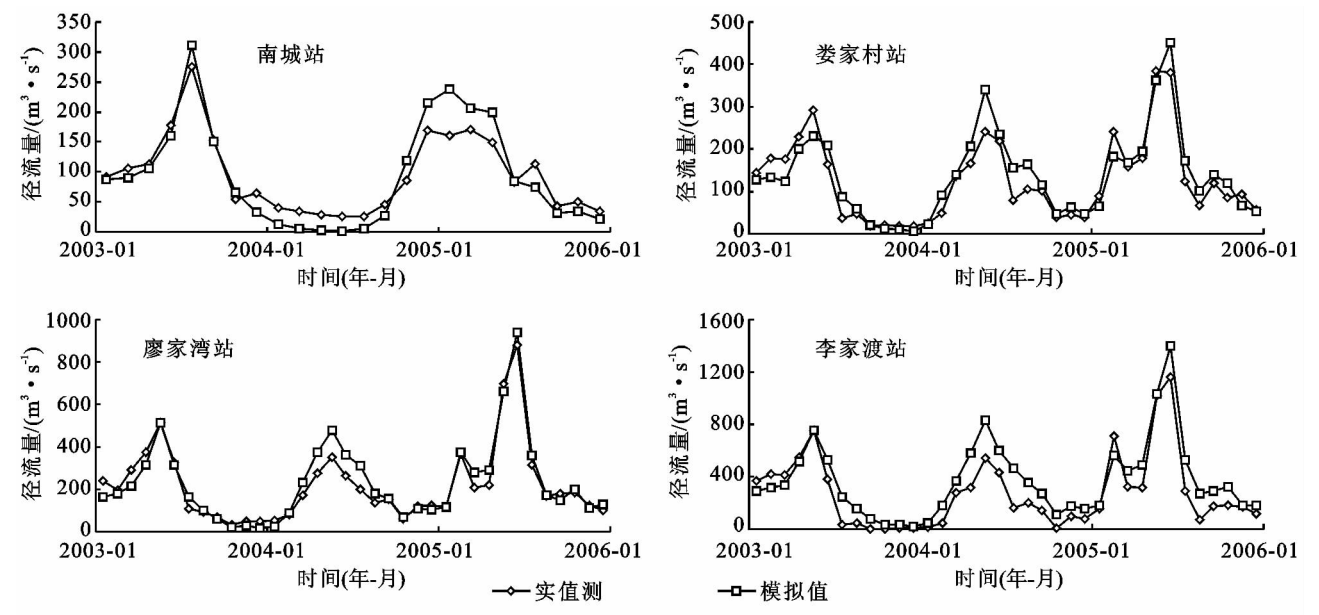


图 4 抚河流域各测站 2003—2005 年径流实测值和模拟值月拟合曲线

表 1 SWAT 模型校准和验证所用的最佳标准					
测站	评价参数	校准期		验证期	
		径流	泥沙	径流	泥沙
南城	R_e	-4.43	-11.37	-0.84	4.71
	NSE	0.80	0.80	0.78	0.81
	R^2	0.87	0.80	0.93	0.81
廖家湾	R_e	-3.77	-12.92	6.07	4.35
	NSE	0.88	0.67	0.92	0.81
	R^2	0.89	0.75	0.93	0.83
姜家村	R_e	-4.45	18.96	8.05	-6.4
	NSE	0.85	0.79	0.84	0.81
	R^2	0.86	0.82	0.86	0.84
李家渡	R_e	19.66	-6.99	33.51	10.47
	NSE	0.74	0.64	0.74	0.82
	R^2	0.83	0.70	0.86	0.85

径流:南城、廖家湾和姜家村 3 个测站验证期的相对误差都小于 $\pm 10\%$,李家渡站的相对误差则较大,不满足评价标准,其原因是:李家渡处于赣抚平原,经济较发达,人口较多,取水口一般都设在抚河,其取水量占整个抚河总取水量的 25% 多^[13],对抚河径流有重要影响,所以造成实际流量较模拟值偏小。南城、廖家湾、姜家村和李家渡站的决定系数 R^2 分别为 0.93,0.93,0.86,0.86;各个测站的 NSE 值都大于 0.7,其中李家渡站的 NSE 值略低,为 0.74,其余各站均大于 0.78。

泥沙:各个测站验证期的相对误差都小于 $\pm 15\%$ 。南城、廖家湾、姜家村和李家渡站的决定系数 R^2 分别为 0.81,0.83,0.84,0.85;各个测站的 NSE 值都大于 0.81。以上校准与检验证明,除了李家渡

外(未考虑取水量对模拟结果的影响),SWAT 模型对研究区所有站点的径流、泥沙模拟都达到了满意的精度。表明了模型在抚河流域的适宜性。

2.3 土壤侵蚀分析

基于 SWAT 模型的模拟结果,对研究区土壤侵蚀状况进行了分析。(1) 土壤侵蚀强度分级。根据 SWAT 模型模拟的 1999—2005 年各子流域泥沙负荷的平均值来计算各子流域的侵蚀模数,然后按照土壤侵蚀强度分级标准,对各子流域内的土壤侵蚀强度进行了分级。从模型模拟结果来看,抚河流域内微度侵蚀区域面积为 8 029. 53 km²,占流域面积的 51. 9%,主要分布在支流—临水流域及流域北部出口处;轻度侵蚀区域总面积为 7 434. 83 km²,占流域总

面积的 48. 1%,主要分布在流域南部抚河上游和东部的黎滩河小流域。(2) 不同土地利用类型对产沙的影响。通过对流域内定义的 368 个水文响应单元的泥沙负荷进行统计,得到模拟年份 1999—2005 年不同土地利用类型的泥沙负荷及平均侵蚀模数(表 2)。前期土地利用分类时,将裸地归入了城乡及工矿用地类型中,因此从结果来看,受人为扰动因素、植被覆盖度的影响,城乡及工矿用地的土壤侵蚀模数比耕地要大;在当地,果园主要位于山区的山坡上,其作物主要是南丰金桔,受经济利益的驱动,金桔在区域内的种植范围一直在扩大,对土壤侵蚀的影响也很巨大。而从产沙量的绝对量来看,林地的产沙量是最大的,这与该类型在区域内的面积占较大比重有关。

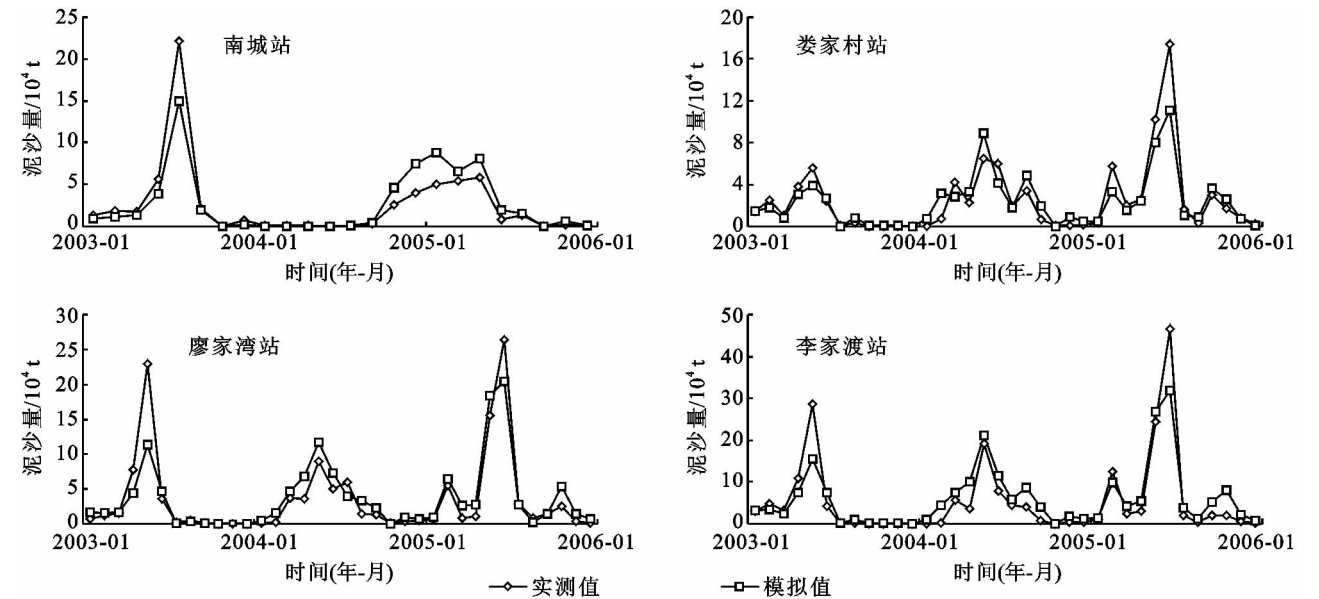


图 5 抚河流域各测站 2003—2005 年泥沙实测值和模拟值月拟合曲线

表 2 抚河流域不同土地利用类型泥沙负荷

土地利用类型	实际面积/km ²	计算面积/km ²	产沙量/10 ⁴ t	平均侵蚀模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)
耕 地	584. 90	584. 90	54. 19	926. 46
果 园	26. 65	26. 65	2. 19	823. 25
城乡及工矿用地	506. 53	506. 53	49. 19	971. 06
林 地	10468. 38	10468. 36	702. 17	670. 75
水稻田	3800. 97	3800. 96	237. 30	624. 32
水 域	76. 93	76. 93	—	—

3 结 论

本文选择抚河流域为研究区,应用 SWAT 模型对研究区的径流、产沙状况进行了校准和验证,结果表明:流域内 4 个测站月径流、月输沙量的校准期和验证期的决定系数在 0. 7~0. 93 之间,Nash-Sutteliffe 系数在 0. 64~0. 92 之间,径流、泥沙模拟结果达到满意精度,SWAT 模型在本区域具有良好的适用

性。在此基础上分析了抚河流域土壤侵蚀强度特征,探讨了不同土地利用条件对产沙的影响,结果表明:抚河流域的土壤侵蚀以微度侵蚀和轻度侵蚀为主;受人为扰动因素、植被覆盖度的影响较大,城乡及工矿用地的土壤侵蚀模数比耕地要大;而从产沙量的贡献来看,林地的产沙量绝对值是最大的,这与区域内林地面积占较大比重有关。

(下转第 24 页)

过程,建立以指数函数为特征的模型模拟此过程,更适合描述紫色土丘陵区非饱和条件下坡地径流溶质迁移变化过程。

参考文献:

- [1] 傅斌,王玉宽,朱波,等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):39-41.
- [2] 李瑞,李勇,刘云芳,等. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究,2012,19(9):7-9.
- [3] 杨文志,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:北京科学出版社,2000.
- [4] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [5] 孔刚,王全九,樊军,等. 前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J]. 土壤通报,2008,12(6):1395-1397.
- [6] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报,2000,20(4):27-30.
- [7] 袁建平,将定生,甘淑,等. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报,1999,17(3):259-264.
- [8] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流—产沙试验研究[J]. 水土保持研究,2010,17(1):1-4.
- [9] 满秀玲,范金凤,谭晓京,等. 森林和沼泽对溪流水化学特征的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(6):992-996.

(上接第18页)

参考文献:

- [1] Santhi C, Srinivasan R, Arnold J G, et al. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas[J]. Environmental Modelling & Software, Corrected Proof, 2006,21(8):1141-1157.
- [2] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid sub-tropical region using a physical process based model[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2006,113(1/4):62-72.
- [3] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modeling of the United States with the Soil and Water Assessment Tool[J]. Water Resources Development,1998,14(3):315-325.
- [4] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究,2007,14(6):89-94.
- [5] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报,2004,18(3):5-8.
- [6] 卢爱刚,索安宁,张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. 水土保持研究,2011,18

- [10] Philip J R. Hillslope infiltration: planar slopes[J]. Water Resources,1991,27(1):109-117.
- [11] 安晓奇,郭成久,苏芳莉,等. 土壤前期含水量对弃渣坡面侵蚀特性影响的模拟试验[J]. 水土保持研究,2009,16(6):117-118.
- [12] 王全九,穆天亮,王辉,等. 土壤溶质随径流迁移基本特征分析[J]. 水土保持研究,2008,15(6):38-41.
- [13] 孔刚,王全九,樊军,等. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):14-18.
- [14] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理及预测评价建模[D]. 重庆:西南大学,2002.
- [15] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等. 水蚀条件下土壤初始含水量对黄土坡地溶质迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(4):1-6.
- [16] 王全九,王文焰,沈冰,等. 降雨—地表径流—土壤溶质相互作用深度[J]. 水土保持学报,1998,12(2):41-46.
- [17] Ahuja L R, Sharpley A N, Yamamoto M, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction a determining by ^{32}P [J]. Water Resources Research,1981,17(4):969-974.
- [18] Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. J. Environ. Qual.,1983,12(1):34-40.
- [19] Ahuja L R. Release of soluble chemical from soil to runoff[J]. Trans. Am. Soc. Agricu. Eng.,1982,25(4):948-953,960.

(2):57-65.

- [7] 杨巍,汤洁,李昭阳,等. 基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区径流与泥沙模拟[J]. 水土保持研究,2012,19(2):77-81.
- [8] 江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京:中国农业科技出版社,1991.
- [9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009[R]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service,2011.
- [10] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. SWRRB: A Basin Scale Simulation Model For Soil and Water Resources Management [M]. College Station: Texas A&M Press, 1990.
- [11] USDA-SCS, National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, chap. 4-10, (US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC, USA,1972.
- [12] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Trans. ASAE, 1977,20(6):1100-1104.
- [13] 抚州市水文局. 抚州市水资源公报[R]. 抚州:抚州市水文局,2005.