

基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究

张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 程红光, 李道峰

(北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘 要: 以黄河下游小花间(小浪底-花园口)区域洛河卢氏水文站以上流域为研究区, 在 GIS 技术支持下, 应用分布式模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 进行了流域产流产沙模拟。采用卢氏水文站 1992~1997 连续 6 年的实测月均径流和泥沙数据对模型进行了校准; 在模型校准过程采用自动数字滤波技术将径流总量划分为直接径流和基流, 并分别对直接径流和基流进行了校准, 以达到径流总量的拟合, 在此基础上对流域泥沙负荷进行了校准; 采用 1998~1999 连续 2 年的实测月均径流和泥沙数据对模型的适用性进行了验证。采用相对误差 (RE)、决定系数 (R^2) 以及 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Ens) 作为模型适用性的评价系数, 结果表明 SWAT 模型在研究区对流域长期连续径流和泥沙负荷模拟具有较好的适用性, 具有一定的推广意义。

关键词: SWAT; 中尺度流域; 黄河; 径流; 泥沙

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)04-0038-05

Runoff and Sediment Yield Modeling in Meso-scale Watershed Based on SWAT Model

ZHANG Xue-song, HAO Fang-hua, YANG Zhi-feng, CHEN G Hong-guang, LI Dao-feng

(Key Laboratory to Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The upper watershed of Luo River which is located in the Xiaohua District (Xiaolangdi-Huayuankou) was selected as the study area to validate distributed SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model with the support of GIS technology. Monthly runoff and sediment yield data from 1992 to 1997 were used to calibrate SWAT. In the process of calibration automated digital filter technique was used to partition direct runoff and base flow. The direct runoff was firstly calibrated, then the base flow, and the total runoff were matched. At last the sediment yield was calibrated to match well. After calibration, monthly runoff volume and sediment yield data from 1998 to 1999 were used to validate SWAT model. Relative Error (RE), Determination Coefficient (R^2) and Nash-Sutcliffe Efficiency (Ens) were used to evaluate the applicability of SWAT model, the results show that SWAT model could be successfully used to model long-term continuous runoff and sediment yield in the meso-scale watershed in the Yellow River Basin.

Key words: SWAT; meso-scale watershed; the Yellow River; runoff; sediment

1 引言

土壤侵蚀已成为极为严峻的环境问题之一, 对它进行准确的预报具有重要的实践意义。流域土壤侵蚀预报模型分为集总模型和分布式模型两种, 集总模型反映流域的总体或者平均行为^[1], 分布式模型则将流域划分为若干网格或代表性基本单元^[2]作为计算单元, 通过对计算单元的赋值来反映影

响土壤侵蚀的各种因素在流域内的差异, 然后根据一系列反映侵蚀过程的运算程序计算单元的产流产沙, 最后进行河道演算, 从而达到比较准确地预报整个流域产流产沙的目的。分布式模型比集总式模型能更准确地反映自然小流域的侵蚀状况。GIS 和 RS 技术的进步使分布式模型得到了长足的发展。我国学者也对应用分布式模型进行流域产流产沙模拟作了一些研究, 如牛志明等应用 ANSWER 2000 在三峡库区

收稿日期: 2003-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043605); 教育部博士点基金资助项目(20010027013)。

作者简介: 张雪松(1979-), 男, 山东聊城人, 硕士生, 主要从事水资源水环境方面的研究。

小流域进行了土壤侵蚀模拟^[3], 刘高焕等基于地块汇流网格进行了小流域水沙运移模拟^[4], 但是目前对中尺度流域应用分布式模型进行产流产沙进行模拟的先例较少。本文选取分布式模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)^[5], 基于 GIS 技术, 在中尺度流域研究区进行产流产沙模拟研究。

2 材料与方法

2.1 研究区简介

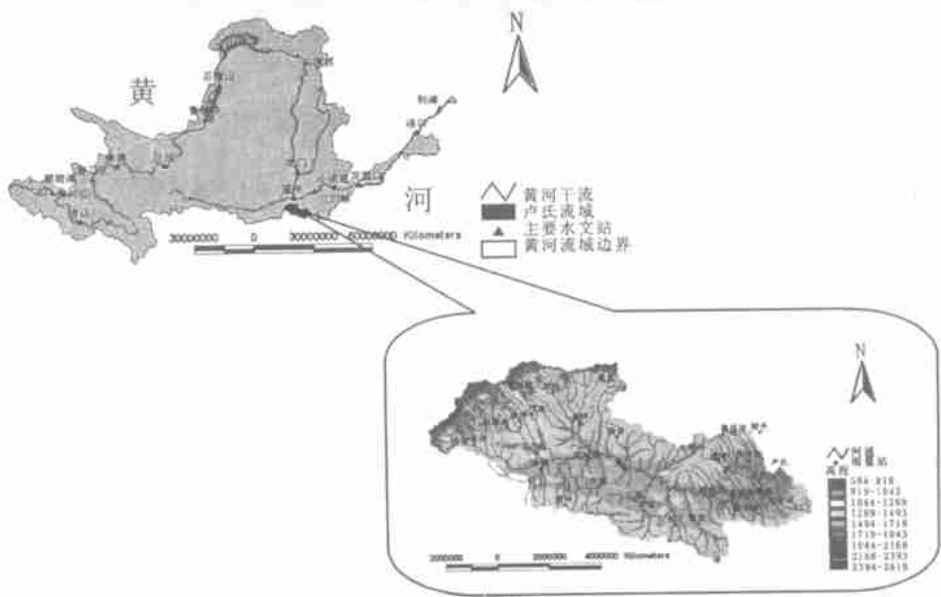


图 1 卢氏流域地理位置与水系图

2.2 模型简介

SWAT 是美国农业部 (USDA) 开发的流域尺度的分布式模型, 用于模拟预测长期土地管理措施对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响^[7], SWAT 模型对径流和泥沙负荷的预测能力在美国已经得到广泛的验证^[8]。模型应用 TOPOAZ (Topographic Parameterization) 自动进行数字地形分析的软件包, 基于 D8 方法、最陡坡度原则和最小给水面积极值的概念^[9-12], 对输入栅格型 DEM 进行处理, 定义流域范围, 划分亚流域, 确定河网结构和计算子流域参数。当集水区面积阈值 (形成河流的最小集水面积) 被划定之后, 自动划分亚流域。在亚流域划分的基础上其采用代表性基本单元概念划分计算单元, 根据不同土地利用和土壤类型的组合在每一个亚流域内进一步划分 HRU, HRU 以非空间方式模拟, 即以在某一亚流域中土壤和土地利用协同变化特征的概率分布来表征。本文选用 SCS 径流曲线数法和 Muskingum 法模拟流域产流, 应用修正的通用水土流失方程 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 和 Bagnold 泥沙输移方程来模拟流域泥沙负荷^[5]。

2.3 基础数据处理

研究区 DEM 采用 1:250 000 国家基础地理信息系统数据, 在 GIS 技术支持下对 DEM 进行图幅拼接, 应用 Arc/Info 将该投影转换为单位为 m 的 ALBERS 投影, 此外还利

本文以黄河下游小花间 (小浪底-花园口) 区域洛河上游卢氏水文站以上流域 (以下称卢氏流域) 对 SWAT 模型进行验证, 其地理位置和水系如图 1 所示。卢氏流域河道长 196.3 km, 流域面积 4 623 km², 该区水蚀模数在 1 000~2 000 t/(km²·a), 在整个黄河流域属中等程度^[6]卢氏水文站年输沙模数可达 770 t/(km²·a)。

用黄河流域 1:100 万的土壤类型和 1:100 土地利用图。降水数据采用卢氏水文站以上 24 个雨量站 1992~1999 年的日降水数据。应用 Visual Basic 语言自行编制程序, 根据研究区 1981~2000 年的气象数据计算模型所需的气温、相对湿度、太阳辐射以及风速等参数。农业耕作制度根据实地调查, 主要模拟冬小麦与夏玉米轮作以及冬小麦与大豆轮作。

3 模型校准与验证

本文选用相对误差 (RE)、决定系数 (R²)^[13] 以及 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 (Ens)^[14] 评价模型适用性。相对误差计算公式为:

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中: Re ——模型模拟相对误差, P_i ——模拟值, O_i ——实测值。若 RE 为正值, 说明模型预测或模拟值偏大; 若 RE 为负值, 模型预测或模拟值偏小; 若 $RE = 0$, 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, 其值越小反映出数据吻合程度越低。Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 (Ens) 的计算公式为:

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

式中: Q_o ——实测值, Q_p ——模拟值, Q_{avg} ——实测平均值, n ——实测数据个数。当 $Q_m = Q_p$ 时, $Ens = 1$; 如果 Ens 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更低。

根据数据获取的完整性, 选用 1992 至 1997 年卢氏水文站的径流和泥沙数据进行校准, 并采用模型校准过程中所得

到的参数, 应用 1998 至 1999 年的实测数据进行模型验证。本文所采用的校准 SWAT 参数的步骤 (如图 2 所示) 是对 Santhi 等所采用模型校准步骤的修正^[15], 参数校准的方法采用两阶段“Brute Force”法^[16], 本文所调整的模型参数的说明与参数校准的最终值见表 1。

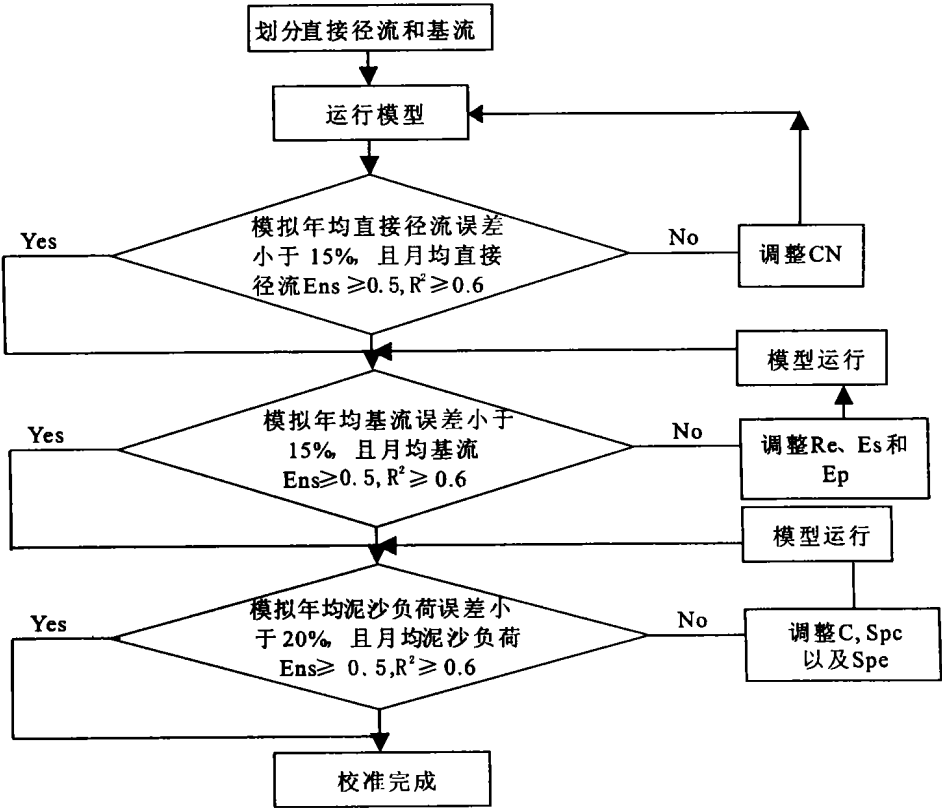


图 2 SWAT 模型校准步骤

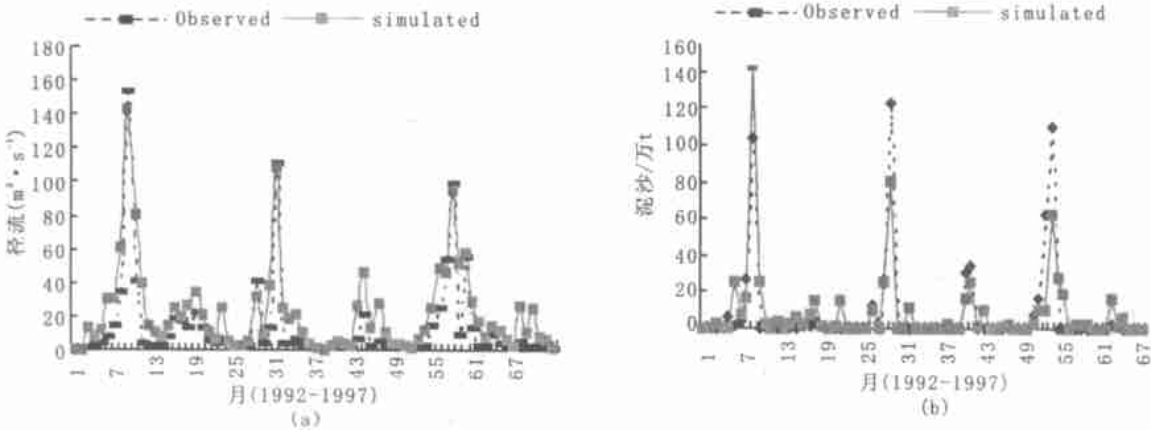


图 3 校准期实测与模拟的月径流与泥沙负荷

3.1 径流

径流校准首先采用自动数字滤波技术 (Automated Digital Filter Technique)^[17], 对模拟和实测值进行直接径流 (地表径流与壤中流) 与基流的分割, 然后分别对直接径流和基流进行校准。首先对直接径流进行校准, 调整的参数为径

流曲线数 (CN), 其调整范围为初始值 ± 8 ^[18], 本文根据不同 HRU 的 CN 值, 计算得其面积平均初始值为 6%。在直接径流校准达到图 2 所要求标准的前提下对基流进行校准, 对于基流校准调整的参数包括: 地下水再蒸发系数 (Re 表示水由浅层含水层返回地表土壤层或植物根区和植物根系吸收), 土

壤蒸发补偿系数(E_s), 和植物蒸发补偿系数(E_p)。最终使总径流量得到较好的拟合。

3 2 泥 沙

泥沙的校准包括: 针对不同土地利用条件, 调整

MUSLE 方程中的土地覆被因子(C); 对河道泥沙输移演算参数进行调整, 如计算最大再悬浮泥沙负荷的线性系数(S_{pc})和指数系数(S_{pe})来拟合泥沙负荷的模拟与实测值, 这两个参数的调整表征河道性质的改变^[19]。

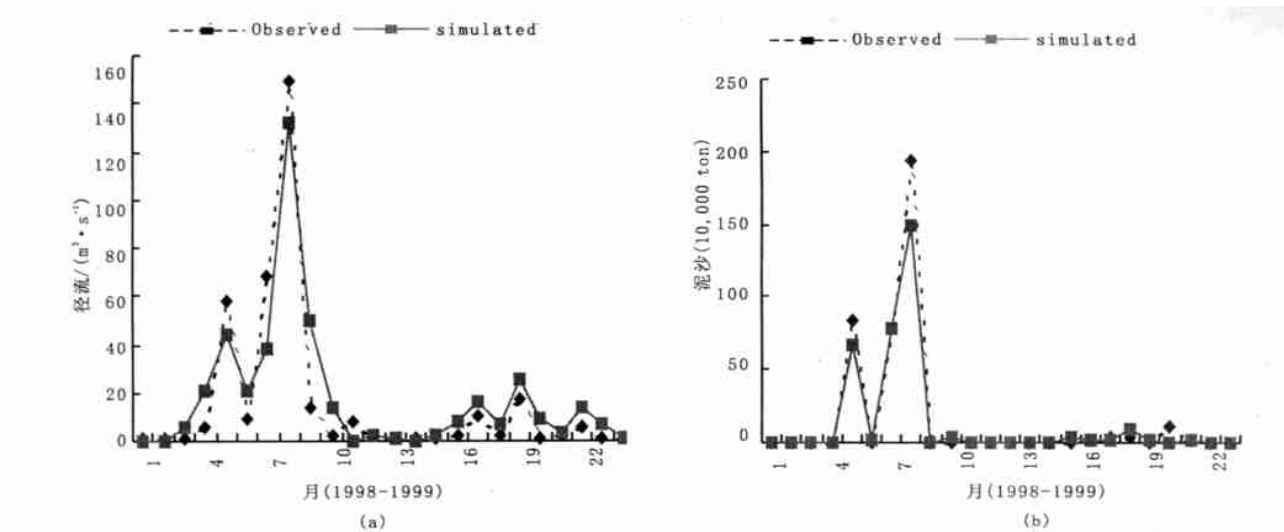


图 4 验证期实测与模拟的月径流与泥沙负荷

4 结果与讨论

4 1 模型校准结果

径流: 径流的模拟值与实测值拟合较好, 如图 3a 所示。由实测数据采用自动过滤技术所得到的基流系数为 0.50, 由模拟值计算得到的基流系数为 0.46。表 2 列出了对径流校准结果的评价系数值, 径流模拟与实测的均值相对误差 $RE < 15\%$, R^2 和 Ens 系数值均大于 0.8, 模拟值和实测值之间的拟合较好。对径流的校准结果满足图 2 SWAT 模型校准步骤中的要求, 表明模型对流域产流过程的模拟是符合实际的。

泥沙: 流域泥沙负荷的模拟与实测值如图 3b 所示。根据表 2 的评价系数可知模拟与实测值的相对误差 $RE < 13\%$, R^2 和 Ens 值均为 0.70, 对泥沙负荷的校准结果也满足图 2 SWAT 模型校准步骤中的要求, 表明 SWAT 模型对泥沙负荷的模拟精度是可以接受的, 可以用来预测泥沙负荷。

表 1 模型校准参数的说明与最终值

参数	模拟过程	参数说明	值域/变化范围	参数最终值
CN	径流	径流曲线数	± 8	+ 2
Re	径流	地下水再蒸发系数	0.00 to 1.00	0.10
Es	径流	土壤蒸发补偿系数	0.00 to 1.00	0.2
Ep	径流	植物吸收补偿系数	0.00 to 1.00	0.10
C	泥沙	土地覆被和管理因子	0.003 to 0.45	草地: 0.006 林地: 0.010 耕地: 0.20
Spc	泥沙	泥沙输移线性系数	0.0001 to 0.01	0.0008
Spe	泥沙	泥沙输移指数系数	1.0 to 1.5	1.0

4 2 模型验证结果

径流: 验证期径流的模拟与实测值如图 4a 所示。由实测数据, 采用自动过滤技术所得到的基流系数为 0.44, 由模拟值计算得到的基流系数为 0.43。模拟与实测径流的均值相差 $2.26\text{ m}^3/\text{s}$, 相对误差 RE 为 14.6%, 评价系数 R^2 和 Ens 值均大于 0.80, 表明模型在研究区对流域产流模拟的适用性较好。

表 2 1992~ 1997 年模型校准结果评价

变量 (单位)	均值		RE	R^2	Ens
	实测	模拟			
径流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	13.15	12.29	- 6.5%	0.87	0.86
泥沙负荷/ (10 000 t)	8.05	8.87	10.2%	0.70	0.70

表 3 1998~ 1999 模型验证结果评价

变量 (单位)	均值		RE	R^2	Ens
	实测	模拟			
径流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	15.45	17.7	14.6%	0.85	0.83
泥沙负荷/ (10 000 t)	15.77	13.41	- 15.0%	0.98	0.94

泥沙: 验证期模拟和实测的泥沙负荷如图 4b 所示。模拟与实测流域泥沙负荷的相对误差 RE 为 14.6%, R^2 和 Ens 值均大于 0.90, 说明 SWAT 模型对流域泥沙负荷的预测较为准确, 但是 R^2 和 Ens 值如此之高, 可能是由于泥沙测量难度大, 实测数据误差较大造成; 同时由于 1998 年泥沙负荷较高且拟合较好, R^2 和 Ens 值分别为 0.989 和 0.944, 虽然 1999 年泥沙负荷拟合不好, R^2 和 Ens 值分别为 0.03 和 - 0.39, 对于总体评价而言, 由于 1998 年的产沙量占到了 1998 和 1999 年总泥沙负荷的 88.9%, 因此对整体的 R^2 和 Ens 值影响不大。这也在一定程度上说明 SWAT 模型适合降雨

较丰富, 产流产沙较多的情景, 而对降雨量较小, 产流产沙较少的情景不太适合。

5 结 语

本文选择黄河下游小花间(小浪底-花园口)区域内洛河卢氏水文站以上流域为研究区, 对分布式模型 SWAT 进行了验证。采用连续 6 年的卢氏水文站实测径流和泥沙数据对模型进行了校准, 在模型校准过程中考虑了径流成分的划分; 采用连续 2 年月均径流和泥沙数据对模型的适用性进行了验证。模型对流域产流产沙模拟的相对误差在模型校准期和验证期均小于或等于 15.0%, 决定系数 (R^2) 和 Nash-

Sutcliffe 效率系数 (E_{ns}) 在均高于或等于 0.70, 表明 SWAT 模型对研究区产流产沙的模拟结果是可以接受的。此外, 王中根等^[20]在黑河莺落峡以上流域对 SWAT 模型的水文部分进行了验证, 其模型效率系数达到 0.83。综上所述, SWAT 模型可以较为准确地模拟中尺度流域产流产沙, 为我国流域水土保持规划提供科学依据。同时 SWAT 模型注重了土壤侵蚀产沙模型的外延, 如将侵蚀产沙模型与非点源污染模型结合, 是一个十分值得推广的综合性分布式流域模拟模型。但是同时也注意到: 本文的研究结果表明 SWAT 模型较适合降雨较丰富, 产流产沙量大的情景, 对降雨较少, 产流产沙量较小的情景模拟结果较差。

参考文献

- [1] 卫海燕, 张科利, 王敬义. 分布式侵蚀预报模型中网格面积的选定-以黄土高原丘陵沟壑区为例[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 578- 583
- [2] Wood, E F, Sivapalan, M, Beven, K, et al. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrology, 1988, 102: 29- 47.
- [3] 牛志明, 解明曙, 孙闯, 等. ANSWER2000 在小流域土壤侵蚀过程模拟中的应用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 56- 60
- [4] 刘高焕, 蔡强国, 朱会义, 等. 基于地块汇流网络的小流域水沙运移模拟方法研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 71- 78
- [5] Arnold, J G, R Srinivasan, R S Muttiah, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1988, 34(1): 73- 89
- [6] 郭建民, 郑金亮. 伊洛河志[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- [7] Neitsch, S L, J G Arnold, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation [EB/OL]. Temple, Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. 2001, <http://www.brc.tamus.edu/swat/swat2000doc.html>
- [8] Arnold, J G, R Srinivasan, R S Muttiah, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance[J]. Journal of American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037- 1051
- [9] Douglas, D H. Experiments to Locate Ridges and Channels to Create a New Type of Digital Elevation Models[J]. Cartographica, 1986, 23(4): 29- 61.
- [10] Fairfield, J, P L eymarie. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models[J]. Water Resources Research, 1991, 30(6): 1681- 1692
- [11] Mark, D M. Automatic Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models[J]. Cartographica, 1984, 21(2/3): 168- 178
- [12] Martz, L W, J Garbrecht. Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models[J]. Computers and Geosciences, 1992, 18(6): 747- 761.
- [13] 陆璇. 应用统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [14] Nash, J E, J V Sutcliffe. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part I: A Discussion of Principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282- 290
- [15] Santhi, C, J G Arnold, J R Williams, et al. Validation of the SWAT Model on Large River Basin with Point and Nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169- 1188
- [16] Allred, B, Haan, C T. Small watershed monthly hydrologic modeling system [M]. Users Manual, Biosystems and Agricultural Engineering Department, Oklahoma State University, Stillwater, OK. 1996
- [17] Arnold, J G, Allen, P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from stream flow [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411- 424
- [18] Mockus, V. Hydrologic Soil-Cover Complexes[A]. In: SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology [M]. USDA - Soil Conservation Service, Washington, D. C. 1969
- [19] Allen, P M, J G Arnold, E Jakubowski. Prediction of Stream Channel Erosion Potential[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1999, 3: 339- 351
- [20] 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