

文章编号: 1000-5013(2008)01-0006-05

# SWAT 模型流域径流模拟研究进展

王 林, 陈兴伟

(福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 分析国内外应用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 模型模拟流域径流的研究现状, 以及流域模型构建, 包括流域基础数据和模拟算法的选取、敏感性参数的分析和模型输出的验证。提出模型的应用研究存在 3 个问题: (1) 模型模拟效率受到基础数据和主观因素的综合影响, 而已有的成果参数选取缺乏可比性, 大多侧重某个因素如何影响模型效率的研究。 (2) 流量是各种水文过程综合作用的结果, 已有模型验证方法研究多是采用流域出口总径流量模拟效率来检验模型的适用性, 这使得模型在水文过程模拟中缺乏可靠性。 (3) 模型应用研究主要进行土地覆被变化和气候波动的水文效应研究, 且多是建立在虚拟情景和简化影响因素基础上。因此, 在模型的应用研究上需要综合考虑影响因素, 以提高模型模拟效率问题。

**关键词:** SWAT 模型; 径流模拟; 模拟效率; 研究进展

**中图分类号:** TV 131.4; P 333

**文献标识码:** A

1994 年, Arnold 开发了 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 模型。这是一个集成遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和数字高程模型(DEM)技术的, 先进的分布式流域水文物理模型, 目前, 已经发展成可用于模拟、预测不同流(区)域多种管理措施下的流域径流、泥沙, 以及非点源污染负荷的代表性分布式水文模型<sup>[1]</sup>。我国也引进并应用该模型多年<sup>[2]</sup>。部分学者针对该模型在国内外研究进展进行了相关总结<sup>[3-8]</sup>, 但大多是概述模型在水文水质方面的有关应用, 缺乏具体针对径流模拟的研究。本文重点总结和分析 SWAT 模型在流域径流模拟, 以及其在应用方面的研究现状。

## 1 径流模型的构建

### 1.1 径流模拟的组成

SWAT 模拟流域径流过程分为两部分: 水循环的陆面部分(即产流和坡面汇流部分)和水循环的水面部分(即河网汇流部分)。前者控制每个子流域内主河道的水量输入量, 后者决定水量从河网向流域出口的输移过程。径流模拟主要由地表径流、蒸散发、土壤水和地下水 4 个部分组成<sup>[9]</sup>。模型提供径流曲线数法(SCS 法)或 Green-Ampt 模型用于计算地表径流; 模型通过计算流域潜在蒸散发和实际蒸散发, 用于评价流域蒸散发量。用于计算潜在蒸散发有 Penman-Monteith(PM), Priestley-Taylor(PT) 和 Hargreaves-Samani(HS) 3 种方法。

总体上看, 基于 SWAT 模型开展流域径流模拟研究<sup>[7-8]</sup>, 主要包括以下两个方面的工作。一是流域径流模型的构建, 包括模型输入数据与模拟算法的选择, 模型参数分析及验证方法研究; 二是径流模型的应用, 包括土地利用变化和气候波动对径流模拟的影响研究。

### 1.2 模型输入数据与模式选取

1.2.1 3 类空间数据的影响 吴险峰等<sup>[10]</sup>研究表明, DEM 的不同水平分辨率对提取流域坡度值影响明显, 导致受长度和坡度因素影响的流域汇流时间和滞时有较大不同。任希岩等<sup>[11]</sup>的研究也得出相似

收稿日期: 2007-11-19

作者简介: 王 林(1983-), 女; 通讯作者: 陈兴伟(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境的研究。

E-mail: cxwchen215@163.com.

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(D0710007); 福建省重点学科建设项目(2004 年)

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结论,认为 DEM 分辨率对坡度值的提取影响较大,在进行流域产流模拟时,应进行坡度校正. Chaplot 等<sup>[12]</sup>通过研究 DEM 和土壤数据的影响效应发现,DEM 栅格大小对径流模拟影响很小,而土壤图比例尺对 SWAT 模型的模拟结果影响较大. Chaubey 等<sup>[13]</sup>认为,DEM 分辨率的选择需根据研究目的,以分辨率 30 m 的 DEM 径流模拟结果为基础,得出 100~200 m 分辨率的 DEM 用于模拟的效率较好,误差小于 10%. Diluzio 等<sup>[14]</sup>利用 DEM、土壤、土地的空间数据耦合生成 12 种下垫面条件,得出流域各空间数据的精度均会影响径流模拟的效率,尤其是土地利用数据的详实程度对于径流模拟的影响很大.

1.2.2 降雨数据空间差异的影响 张雪松等<sup>[15]</sup>的研究表明,相同雨量站密度条件下,选取不同的雨量站分布对流域径流模拟结果影响不同,而在面雨量相近但降雨空间分布相差较大的情景下,径流量的模拟值也相差较大. 陈利群等<sup>[16]</sup>研究了站网密度和面平均雨量误差的关系,提出在水文模拟中雨量站的多少存在上限和下限,且雨量站所处空间位置的高程值、坡度和坡向都影响着模拟产流量. Chaplot 等<sup>[17]</sup>在两个下垫面条件不同的中尺度流域中分别研究雨量站的数量对于径流模拟的影响,结果表明丰富的雨量站有助于提高模型模拟效率,但单一的雨量站对于月径流模拟效率的影响程度并不显著.

1.2.3 子流域划分阈值的影响 Bingner 等<sup>[18]</sup>发现,流域径流总量的模拟效率对于不同数量的子流域划分表现稳定,但确定最佳划分方案需对不同子流域的土地利用、坡度和坡长的敏感性进行分析. 郝芳华等<sup>[19]</sup>选择两个面积不同的流域,研究不同的子流域划分数量与产流量的关系. 模拟结果表明,产流量随子流域数量的增加而增大,但变化幅度较小,且存在一个子流域划分水平. 当超过此水平时,子流域数量的变化对产流量几乎没有影响. Jha 等<sup>[20]</sup>以 4 个面积大小不等的流域作为研究区,模拟在不同子流域划分条件下的产流、产沙和污染物,提出最佳子流域划分水平应根据研究对象来确定.

胡远安等<sup>[21]</sup>认为,SWAT 模型输出空间分割的响应关系与空间异质性特征密切相关,并提出合理的子流域面积特征尺度应当在空间自相关尺度的 1/2~1/3 之间. Tripathi 等<sup>[22]</sup>认为子流域划分尽管对于径流总量模拟效率的影响不大,但对于径流形成过程中的蒸发、下渗和土壤水有影响. Misgana 等<sup>[23]</sup>研究了 6 种子流域划分情形下的径流总量、地表径流、侧流和地下水的变化,表明随着划分阈值的增大各变量呈现减少的趋势. 胡连伍等<sup>[24]</sup>模拟了丰乐河 6 种子流域划分下的产流变化,结果表明,该流域利用 11~41 个子流域划分层次对模拟结果的影响相对比较稳定,低于或超过这一范围,均会引起模拟要素的较大波动.

1.2.4 模拟算法选择与改进 张东等<sup>[25-28]</sup>采用 5 种潜在蒸散量计算方法,详细讨论各方法的适用性及模拟精度. 文<sup>[25-26]</sup>最后选取 PM 法作为研究流域蒸散量计算的首选方法,并通过数据分析提出利用高程对模拟结果进行修正,可提高蒸散量模拟的精度. 此外,针对模型在中国西北寒旱区的应用对模型进行了扩充和改进,增加了土壤粒径转换模块和天气发生器(WGEN)数据预处理模块,改进了模型中的 WGEN 算法、潜在蒸散量模拟算法,以及气象参数的空间离散方法,用以提高模型的使用效率. Kannan 等<sup>[29]</sup>通过结合模型本身提供的不同的潜在蒸散发和径流方式,并耦合影响径流模拟的敏感性参数和影响,模拟效率的校准和验证时段的比较,旨在选取适合用于流域模拟的蒸发和径流模式. 最后认为,利用曲线指数(Curve Number, CN)的径流方式和 HS 蒸散发相结合的方法用于日径流模拟效果最好.

## 1.2 模型参数分析与验证方法

1.2.1 模型参数的分析 Heuvelmans 等<sup>[30]</sup>选取了对径流模拟效率较敏感的 7 个参数,利用单参数法和参数组合法,研究参数分布特征对于模拟结果的影响. 结果表明,参数组合法用于模拟的效率高于单参数法,但单参数法有助于进一步解释区域参数空间差异的物理意义. Muleta 等<sup>[31]</sup>选取全局灵敏度分析法、拉丁超立方体抽样技术和通用似然不确定性估计法,运用于模型参数的不确定性分析与评价. van Griensven 等<sup>[32]</sup>利用 LH-OAT 法选取两个流域,分别研究 SWAT 模型用于径流、泥沙和污染物模拟过程中不同参数对于模拟过程的敏感性评价. 最后得出 CN 值对于各水文模拟过程的敏感性都很高,并提出流域水文模型模拟过程中,参数的选取都需要通过敏感性分析方法来判断,以用于模型参数的校准和不确定性分析. 朱新军等<sup>[33]</sup>对建模过程中对径流过程有较大影响的 6 个参数,分别进行敏感性分析,并总结敏感参数对流域水量平衡各要素的影响规律.

1.2.2 模型输出的验证 杨桂莲等<sup>[34]</sup>将滤波技术分割的基流结果应用于 SWAT 模型的基流校准,为 SWAT 模型进行地下水研究提供有利途径. Narasimhan 等<sup>[35]</sup>研究得出,可以通过 NOAA-AVHRR 遥

感数据计算的归一化植被指数(NDVI)反演流域土壤湿度和蒸发量,用于模型的校准和验证. Qi 等<sup>[36]</sup>通过模拟流域内 5 个站点的地表径流、地下水和径流总量,用于评价模型模拟的效率. Cao 等<sup>[37]</sup>利用流域内的 7 个站点的潜在蒸散发、总产水量、日径流量和土壤含水量等模拟结果,进行模型的校准和验证,提出综合利用多站点多要素相结合的方法评价模型模拟结果,更客观和真实确定模型参数.

## 2 径流模型的应用

### 2.1 不同土地覆被条件下的径流模拟

国外的许多研究都已表明,SWAT 模型能很好地用于不同土地覆被下的水文响应分析.在国内,陈军锋等<sup>[38]</sup>应用 SWAT 模型,定量地评估了土地覆被变化对径流、蒸发和洪峰流量的影响.结果表明,随着土地覆被状况由无植被到全是有林地覆被,径流深减小、蒸发量增加,在相同的洪水重现期,流域全为有林地覆被的情景明显小于无植被的情景洪峰流量.郝芳华等<sup>[39]</sup>通过假设 3 种土地利用情景模拟洛河流域产流变化,模拟表明森林相对于草地和农业用地具有增水的作用.代俊峰等<sup>[40]</sup>系统地研究了红壤丘岗集水区 4 种林草系统(自然草被、阔叶林、混交林和针叶林)的地表径流、根层渗漏、蒸发蒸腾、土壤蓄水量的时空特点,结果表明土地利用方式是区域短期水量平衡的主要影响因子.

### 2.2 气候波动的水文效应

国外应用 SWAT 模型分析气候变化水文效应的研究也较多,在气候变化研究中,主要应用大气环流模式(GCMs)进行气候变化的水文要素分析.国内大多是采用增减研究区气温和降水的方法,研究气候波动的水文效应.朱利等<sup>[41]</sup>在研究区 5 年平均日降水和日气温基础上,温度增加 1~4 °C,降水增或减 10%~20%,组合成 25 种气候变化模式,研究径流及实际蒸发对气候变化的响应.分析指出,流域内降水的变化对水资源的影响要大于气温的变化对水资源的影响.

此外,考虑环境要素共同作用下的水文效应,也是模型应用的研究趋势.国内学者在研究区气候和下垫面基础上,综合气候方案假定法和情景模拟法,用于流域径流模拟.陈军锋等<sup>[42]</sup>定量研究梭磨河流域的气候波动和土地覆被变化对流域径流的影响,结果表明在径流变化中,气候波动引起的因素约占 3/5~4/5,而由土地覆被变化引起的因素约占 1/5.李道锋等<sup>[43]</sup>通过建立 5 种土地覆被及 24 组气温和降水组合情景,模拟黄河河源区的年径流量,得出气温减少 2 °C 且降水增加 20% 时,流域径流量增加最大;车骞等<sup>[44]</sup>也采用类似模拟方法用于黄河源区水资源预测. Michael 等<sup>[45]</sup>研究了 5 个不同试验流域的气候、地形、土壤和土地利用条件下的径流模拟,结果表明模型在湿润条件下的模拟效率较高.

## 3 问题与讨论

模型模拟效率受到基础数据,包括研究区 DEM、土壤土地利用等空间数据精度,以及主观因素,包括子流域划分、模拟算法选取、合理的参数率定等的综合影响.由于研究流域尺度各异,流域内气候和下垫面资料差异悬殊,参数选取也缺乏可比性.已有的成果多是侧重某个因素如何影响模型效率的研究,因此综合研究影响因素以提高模型模拟效率问题有待于进一步探讨.从已有模型验证方法看,多是采用流域出口总径流量模拟效率来检验模型的适用性.流量是各种水文过程综合作用的结果,这样使得模型在水文过程模拟中虽然流量模拟得很好,但中间的过程可能是完全错误的.尽管国外部分学者已尝试采用多站点、多要素方法用于模型验证,从空间尺度上较大程度地改善模型验证效果,但在时间尺度上仍缺乏有效的评价手段.因此,如何更有效地进行 SWAT 模型模拟结果的验证,还需要大量的研究工作.

此外,模型应用研究不足,多是进行单一影响要素如土地利用变化或气候波动下的水文效应分析.国内在该方面研究分析尚处于初期阶段,主要通过设立虚拟土地利用变化和气候波动情景用于模型模拟,而采取虚拟情景用于水文模拟与实际情况仍存在着较大差距.同时,研究侧重于环境变化对流域径流、蒸发和下渗量的影响分析,未考虑其所引起的水量平衡变化对流域水资源开发利用存在的影响,更缺乏对流域内水利工程如水库的影响研究.目前,国内外有关土地利用变化的水文效应研究,都假设土壤和下垫面的小气候没有发生变化,而有关气候波动的水文效应研究,都不考虑降水和气温变化的空间分布差异.这些因素的简化对模拟结果产生的影响,都有待于进一步研究.

## 参考文献:

- [1] PHILIP W G, MANUEL R R, COLLEEN H G, et al. The soil and water assessment tool: Historical, development, applications, and future research directions[J]. Trans ASAE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [2] 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.
- [3] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5): 121-130.
- [4] 丁 飞, 潘剑君. 分布式水文模型 SWAT 的发展与研究动态[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 33-37.
- [5] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.
- [6] 梁梨丽, 汪党献, 王 芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学学报, 2007, 5(2): 125-131.
- [7] 王 林, 张明旭, 陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域径流模拟[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 28-33.
- [8] 王 林, 陈兴伟. 基于 3 个站点校准与验证的晋江流域径流模拟[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 22-27.
- [9] 刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 流域水循环分布式模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 116-127.
- [10] 吴险峰, 刘昌明, 王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 148-154.
- [11] 任希岩, 张雪松, 郝芳华, 等. DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 1-5.
- [12] CHAPLOT V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads predictions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312: 205-222.
- [13] CHAUBEY I, COTTER A S, COSTELLO T A, et al. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty[J]. Hydrol Process, 2005, 19(3): 621-628.
- [14] DILUZIO M, ARNOLD J G, SRINIVASAN R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations[J]. Hydrol Process, 2005, 19(3): 629-650.
- [15] 张雪松, 郝芳华, 张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 9-12.
- [16] 陈利群, 刘昌明, 郝芳华. 站网密度和地形对模拟产流量和产沙量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 18-21.
- [17] CHAPLOT V, SALEH A, JAYNES D B. Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads at the watershed level[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312: 223-234.
- [18] BINGNER R L, GARBRECHT J, ARNOLD J G, et al. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1997, 40(5): 1329-1335.
- [19] 郝芳华, 张雪松, 程红光, 等. 分布式水文模型亚流域合理划分水平刍议[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 75-78.
- [20] JHA M, GASSMAN P W, SECCHI R, et al. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(3): 811-825.
- [21] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源污染模拟的空间分割优化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(3): 367-370.
- [22] TRIPATHI M P, RAGHUWANSHI N S, RAO G P. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components[J]. Hydrol Process, 2006, 20: 1137-1156.
- [23] MISGANA K, JOHN W N, ELIAS G B. Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2007, 12(2): 163-172.
- [24] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 等. 不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 235-240.
- [25] 张 东, 张万昌, 徐全芝. 汉江上游流域蒸发量计算方法的比较及改进[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 97-103.
- [26] 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): 434-440.
- [27] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372-376.
- [28] AMARAKCON D, CHEN A, MCLEAN P. Estimating daytime latent flux and evapotranspiration in Jamaica[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102: 113-124.
- [29] KANNAN K, WHITE S M, WORRALL F, et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000[J]. Journal of Hydrology, 2007, 332: 456-466.
- [30] HEUVELMANS G, MUYS B, FEYEN J. Analysis of the spatial variation in the parameters of the SWAT model with application in Flanders, Northern Belgium[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(5): 931-939.

- [31] MULETA A, MISGANA K, JOHN W N. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2005, 306: 127-145.
- [32] VAN GRIENSVEN A, MEIXNER T, GRIMWA D S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324: 10-23.
- [33] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 105-111.
- [34] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 463-471.
- [35] NARASIMHAN B, SRINIVASAN R, ARNOLD J G, et al. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data[J]. Trans ASAE, 2005, 48(3): 1101-1113.
- [36] QI C, GRUNWALD S. GIS-based hydrologic modeling in the sandusky watershed using SWAT[J]. Trans ASAE, 2005, 48(1): 169-180.
- [37] CAO Wen-zhi, WILLIAM B B, TIM D, et al. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability[J]. Hydrol Process, 2006, 20, 1057-1073.
- [38] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文相应模拟研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833-836.
- [39] 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.
- [40] 代俊峰, 陈家宙, 崔远来, 等. 不同林草系统对集水区水量平衡的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 435-443.
- [41] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 16-22.
- [42] 陈军锋, 陈秀芳. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(2): 833-836.
- [43] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 565-573.
- [44] 车 骞, 王根绪, 孔福广, 等. 气候波动和土地覆盖变化下的黄河河源区水资源预测[J]. 水文, 2007, 27(2): 11-15.
- [45] MICHAEL W V L, TAMIE L V, DAVID D B, et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2007, 12(2): 173-189.

## Review of Study on Watershed Runoff Simulation Based on SWAT

WANG Lin, CHEN Xing-wei

(College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The current status of the application of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model on watershed runoff simulation and model construction, including the selections of the basic data and different hydrological simulation methods, the analysis of sensitivity parameters and model validation are introduced and analyzed. There are three issues on the model application: (1) The selections of the basic data and subjective factors synthetically affect the simulation efficiency of the model. The research results lack comparability, which emphasize particularly on the simulation efficiency of the model affected by certain factor. (2) Runoff is a synthetical effect of different hydrological processes. The total runoff yield simulation of the watershed is used to evaluated the applicability of the model in most of research results, which make the results lack reliability in the simulation of hydrological processes. (3) The hydrological response to land use-cover changes and climate changes are simulated in the model application, but the simulation are mostly based on the virtual scenarios and factor simplification. So the influence factors should be synthetically analyzed in the research of model application to improve the simulation efficiency of the model.

**Keywords:** soil and water assessment tool model; runoff simulation; the simulation efficiency; research development

(责任编辑: 黄仲一)