

分布式水文模型 SWAT 的发展与研究动态

丁 飞, 潘剑君

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要: 分布式流域水文模型研究已成为现代水文模型研究的热点, 是解决流域水文、生态和环境问题的一个有效的途径。SWAT 模型是一种基于 GIS 基础之上的分布式流域水文模型, 近年来得到了快速的发展和应用。主要介绍了 SWAT 模型的发展历程和目前国内外应用研究动态, 以期为我国水文模型的发展和建立提供参考。

关键词: 分布式水文模型; SWAT 模型; 发展历程; 研究动态

中图分类号: P343

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)01-0033-05

Development and Advances in Research on SWAT Model

DING Fei, PAN Jian-jun

(College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Distributed watershed hydrological model has become a focus on the research of modern hydrological model, which can effectively solve the problems such as hydrology, ecology and environment within watersheds. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is an advanced, physically based, distributed hydrological model developed by USDA - ARS, which is now used worldwide for researching watershed hydrology, non-point source pollution, and management of watershed integrated with Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). The authors describe the development of SWAT model, and sum up its primary application, improvement, existing problems and future development. SWAT model is getting widely used in China recently, and some components are modified for Chinese natural conditions. In a word, it can help you in actual research and better water conservation and management in China using SWAT model.

Key words: distributed hydrological model; SWAT model; development; application research

水文模型是水文科学研究中重要的方法和手段之一^[1]。1969 年 Freeze 和 Harlan^[2]发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章, 开始冷了分布式水文模型的研究。分布式水文模型较之其他水文模型, 能更准确的描述水文过程的机理, 并能有效地利用 RS 和 GIS 技术提供的大量空间信息^[3]。近年来, 随着 RS、GIS 技术的迅速发展, 集成 DEM 技术的分布式流域水文模型研究已成为现代水文模拟研究的热点^[4-8], 是解决流域水文、生态和环境问题的一个有效的途径。其中 SWAT 模型以强大的功能、先进的模型结构以及高效的计算, 在分布式水文模型中占有重要地位。

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)开发的基于流域尺度的一个长时段的分布式流域水文模型^[9]。它具有很强的物理基础, 能够利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息模拟地表水和地下水的水量与水质, 长期预测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。模型中产流计算采用的是 SCS 径流曲线数方法 (Modified SCS Curve Number Method), 产沙计算采用的是修正通用土壤流失方程 MU-SLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 方法。

SWAT 模型自开发以来, 在美国、北美寒区已经有了广泛的应用实例, 并在加拿大、澳大利亚、欧洲及亚洲地区结合

各国的区域特点也得到了广泛的应用, 并在应用过程中得到了不断的发展。该模型得到广泛应用的主要原因是该模型应用程序和使用手册等都可以在 SWAT 网站上免费下载, 另外研究者还开办了一个网上论坛供世界各地的模型使用者互相探讨模型在使用中遇到的问题。SWAT 模型近几年才在国内得到应用研究, 相关的模型应用研究和工作经验积累还不太丰富还处在探索阶段。本文旨在概述 SWAT 模型的发展历程以及模型在国内外的动态研究进展, 并且归纳总结 SWAT 模型在应用中存在的问题以及预测该模型未来的发展方向, 为模型应用提供参考价值。

1 SWAT 模型的发展历程

SWAT (Soil And Water Assessment Tool) 是美国农业部农业研究中心 (USDA - ARS) 历时近 30 年开发的基于流域尺度的分布式水文模型, 是在 SWRRB 模型基础上发展起来的一个长时段的流域分布式水文模型。相关文献已经对 SWAT 模型的原理和结构进行了介绍^[10], 这里仅对 SWAT 模型的发展和主要改进作一简要概述。

70 年代中期, 美国开展了“清洁水行动” (Clean Water Act), USDA - ARS 联合全国各地多名科学家组织了一个多学科的研究队伍, 开发了一个以自然过程为基础的非点源模拟模型 CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricul-

* 收稿日期: 2006-02-22

基金项目: 水利部淮河水利委员会“淮河流域水土流失遥感数据处理与评价”项目资助

作者简介: 丁 飞 (1981 -), 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源信息技术和水土保持研究; 通讯作者: 潘剑君。

tural Management Systems)来模拟不同的土地利用对于产水、产沙、土壤养分以及化学物质的流失影响。它是地块尺度(Field Size)、连续时间的模拟模型,可以在日的基础上计算日径流量、峰值流量、表面水入渗、过滤、蒸散发以及土壤水分;同时可以估计在径流、泥沙中溶解的化学物质的积累。

80 年代中期,在 CREAMS 模型的基础上,增加了一个模拟农药/杀虫剂(Pesticides)在植被根部带垂直运动的组件,研制出了 GLEAMS 模型(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)。在地块版本的基础上,90 年代初期推出了流域版(Watershed Version)的 CREAMS/GLEAMS 模型。二者组成了一个具有多种地理过程的综合模型体系,可以模拟径流和泥沙的传输过程,化学物质的传输过程,土壤内部碳和营养物质微循环和热量传导以及作物的生长过程。日径流通过修改过的 SCS 径流曲线数方法(Modified SCS Curve Number Method)计算,土壤侵蚀通过 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)方法计算,模型所学的气象数据参数则通过模型天气生成器 WGEN(Weather Generation Model)来模拟获得。

80 年代中期开始,ARS 的研究人员致力于模拟多种土壤类型、土地覆盖和管理措施的复杂流域的模型研究,这样导致了 90 年代初 SWRRB (Simulation for Water Resources in Rural Basins)模型的研制成功。模型对 CREAMS 模型的主要改进表现为以下几点:(a)可以使模型同时计算多个子流域,预测整个流域的产水量,(b)增加了回流组件、水库和池塘组件、气象模拟模型组件和简单的水流演算组件,(c)开发了更好的方法预测径流峰值率,(d)增加了作物生长模型,(e)增加了模拟泥沙在水库、池塘、河流及山谷的移动组件,(f)可以计算传输损失。经过这些修改后推出的 SWRRB 模型可以应用到面积达几百平方公里的流域。90 年代初以后,SWRRB 模型继续发展,其开发集中在水质的模拟,增加了 GLEAMS 模型的农药/杀虫剂(Pesticides)组件,采用了新的产沙公式(MUSLE)以及 SCS 估计径流峰值率的新技术。

但是 SWRRB 模型最多能把流域划分成 10 个子流域,当研究几千平方公里的较大流域时,可能需要将整个流域划分成几百个子流域,此时 SWRRB 模型就显得无能为力。于是导致了 ROTO 模型(Routing Output to Outlet)的问世。ROTO 模型提供了一个在河道水库的演算方法,把多个 SWRRB 模型的运行结果连接在一起,克服了 SWRRB 模型限制子流域数目的问题。但是 ROTO 模型仍有局限性:多个 SWRRB 模型必须单独运行,结果再输入到 ROTO 模型进行河道和水库调洪演算,并且输入输出文件非常麻烦,对计算机的存储容量也有很大的要求。为了克服这些问题,1994 年以 Arnold 为首的研究组把 SWRRB 和 ROTO 两个模型融合为一体,开发出了一个新的分布式流域水文模型即 SWAT 模型。

SWAT 模型是具有物理机制,以日为时间步长,可进行连续长时段模拟的分布式水文模型,该模型主要由 8 部分组成包括水文、气象、泥沙、土壤温度、农作物生长、营养物质、杀虫剂和农业管理,可同时进行流域的水文过程、水土流失、化学过程、农业管理措施和生物量的模拟。SWAT 模型的水平衡结构如图 1 所示。

SWAT 模型自 90 年代初正式推出,SWAT 模型一直在更新和升级,包括模型的适应性、自动化划分子流域和模型的参数化敏感性和模型的校准和验证以及模型与其他模型的整合等。迄今为止,已经推出了 94.2 版、96.2 版、98.1 版、99.2 版、2000 版等多个版本,最新的版本为

SWAT2005^[11],但都尚未公开发布。另外 ARS 在 1998 年就发布了 GIS 软件(如 GRASS 与 ArcView)与 SWAT 的集成版本,2002 年又被美国环保署集成到 BASINS。图 2 中的 ESWAT、SWIM、SWATMOD、SWAT-G、SWAT-C 和 I_SWAT 是对 SWAT 模型改进后的具有代表性的研究成果。ESWAT 是 Griensven^[12]等对 SWAT 模型的地表径流、河道汇流和水质组件的改进;SWIM 是 Krysanova 等^[13]对 SWAT 模型的水质模块加以改进,并与评价富营养化的 MATSALU 模型得到的;SWATMOD 是 Sophocleous 等^[14]对 SWAT 模型与 MODFLOW 模型改进并结合以更好地模拟地下水。SWAT-G 是 Eckhardt 等^[15]在 SWAT99.2 的基础上改进入渗和壤中流的计算方法以致能更好地模拟山脚地带的水文过程;SWAT-C 是 McKeown^[16]等对 SWAT 模型积水洼组件进行修改和整合森林冠层落叶对土壤层的影响,用以研究火灾和森林砍伐对径流的影响。I_SWAT^[17]是美国爱荷华州立大学农业与农村发展中心的 Gassman 对 SWAT 模型的输入输出数据研究了一个软件扩展程序。

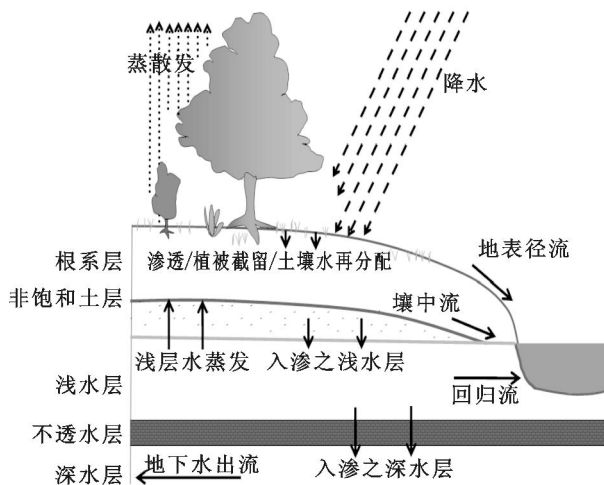


图 1 SWAT 模型的水平衡结构示意图

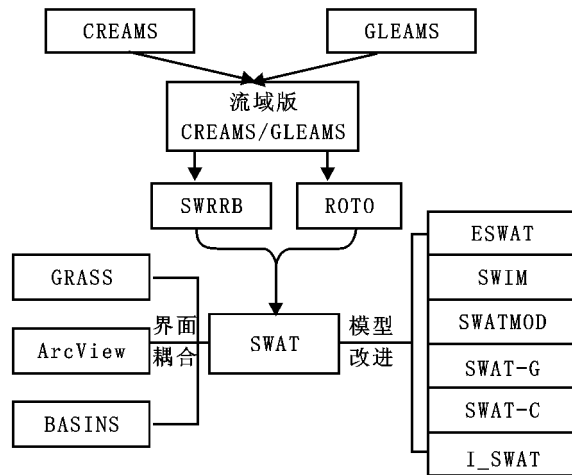


图 2 SWAT 模型的发展示意图

迄今为止,已经成功地举办了三次 SWAT 国际大会,分别在德国吉森、意大利巴里和瑞士苏黎世,来自世界各国的科研机构和科研工作者聚集在一起讨论 SWAT 模型在各自国家的发展、应用状况和存在的问题,为研究出更适合于本国国情的更为精确更为完善的 SWAT 模型做出不懈的努力。

2 SWAT 模型的国外应用研究动态

目前 SWAT 模型在美国已经得到了广泛地应用,尤

其是中西部和西南地区,随着模型的日益完善,SWAT 模型现已在世界上欧洲、亚洲及非洲 27 个国家得到了推广及应用,研究内容涉及到流域水量平衡、非点源污染和流域水文管理等诸多方面,以及模型的改进和相关研究。下面就此应用研究动态归纳概述如下:

2.1 水文模拟研究

水文组件包括径流和泥沙模拟是 SWAT 模型应用最广的方向之一,以最初单纯的水文模拟到研究影响模拟精度的各种影响因素,包括土地利用/覆盖变化、气候变化以及管理措施等。Arnold^[18]模拟土地利用变化来检验 SWAT 模型的水文组件包括地表径流、地下径流、蒸散发以及地下水补给和地下水水位,比较并验证了模拟结果,结果表明地表水模拟 R^2 为 0.79~0.94。Behera 和 Panda^[19]利用 SWAT 模型来模拟不同的管理措施对印度孟加拉西部 Midnapore 流域日径流量和泥沙量以及营养物浓度的影响,并且模拟最佳管理措施 BMPs (Best Management Practices),结果模型成功地模拟了径流和水质,识别了流域内子流域污染严重区,并且从 48 套模拟管理方案中选择了一种最佳管理措施。Romanowicz 等^[20]研究得出 SWAT 模型对土壤图的分辨率和土地利用数据非常敏感。Badas 等^[21]研究得出降雨数据的空间分辨率对模拟结果存在很大的影响。

2.2 非点源污染的研究

非点源污染已经构成当前水质量安全的首要问题,结合水文模型来研究非点源污染是当前水文研究的热点之一。Grizzetti 等^[22]利用 SWAT 模型研究了芬兰 Vantaanioki 流域的 N、P 循环和转化;Bouraoui^[23]应用 SWAT 模型研究了北非突尼斯 Medjerda 流域不同管理措施对该流域地表水产生的潜在影响,得出流域内氮磷负荷的增加主要是由于农业施肥率的增加;2003 年韩国国家环境研究所制定了 TMDL 项目发展的指导方针。该项目利用 GIS 和 RS 数据结合 SWAT 模型对以稻稻田为主的 Baran 流域的径流和非点源污染进行了模拟,结果 R^2 达到了 0.77~0.93^[24];美国环保署采用 SWAT 模型来调查农药的药效和迁移性,评价饮用水质量安全^[25];纽约水资源研究所利用 SWAT 模型来评价纽约市 Cannonsville 水库的水质问题,结果表明流域地表水 68% 的总磷来源于农业用地,仅占流域面积 1.2% 的玉米地是磷的主要污染源^[26]。

2.3 模型输入参数的研究

模型输入参数的精确性直接影响模型模拟的结果。Muleta 和 Nicklow^[27]采用 3 层次技术研究了 SWAT 模型的参数自动化校准,并用逐步回归分析方法对参数的敏感性和不确定性进行了分析;Lenhart^[28]等采用两种不同的方法对 SWAT 模型的参数敏感性进行了分析,得出土壤容重、叶面积指数和坡度坡长等为高敏感参数;Chaplot^[29]研究了 DEM 分辨率和不同比例的土壤图对模拟精度的影响,结果显示 DEM 栅格大小对径流模拟影响不大,但当栅格大小超过 50 m 时对泥沙量和 N 的影响特别大,土壤图比例尺对 SWAT 模拟结果有相当大的影响;Jha 等^[30]基于四个不同大小的流域,研究不同划分子流域条件下的径流、泥沙和营养物质,结果表明子流域划分对径流影响不大,而泥沙、硝酸盐和无机 P 对子流域划分相当敏感;Chen 和 Mackay^[31]得出不同的子流域数目会影响泥沙模拟,泥沙量随着 HRU 数目的增加而下降。Tripathi 等^[32]利用 SWAT 模型对子流域面积的阈值的识别和如何划分子流域包括先后主次进行了研究。

2.4 模型改进和与其它模型对比的研究

Eckhardt 和 Arnold^[33]用 SWAT 模型的改进版本

SWAT-G 结合 SCE (Shuffled complex evolution) 方法对参数自动化校准和验证进行了研究,探讨了 SCE 方法的应用前景;Pandey 等^[34]研究了 GIS 和 RS 技术与 SWAT 模型结合的优点,对流域水资源管理和流域模拟的应用前景;Fontaine 等^[35]增加了一个融雪组件将 SWAT 模型应用到研究山区的积雪-融雪给径流产生的影响,改进的算法模拟的年径流量 R^2 从原来 -0.76 增加到 0.86;Singh 等^[36]比较冷 SWAT 和 HSPF 模型的径流模拟精度,结果显示 SWAT 模型要比 HSPF 模型的效果好,主要原因是两者在计算潜在蒸散发 PET 的方法不同。

3 SWAT 模型在中国的研究现状

SWAT 模型在我国的应用研究刚刚起步,还很薄弱,近几年得到了快速的发展。SWAT 模型在国内的应用研究主要包括产沙产流模拟、非点源污染研究和模型输入参数的研究,另外根据中国的流域自然状况对 SWAT 模型进行相关的改进研究。

王中根、刘昌明等^[11]对 SWAT 模型的原理和结构进行了深入的研究,并将 SWAT 模型引入我国西北寒区的水文过程模拟中,日径流模拟精度高达 0.83;杨桂莲等^[37]基于 SWAT 模型结合数字滤波技术对河南洛河流域径流中的基流进行估算和比较,结果 R^2 达 0.76;胡远安等^[38]研究得出 SWAT 模拟长期径流量比短期径流量准确;张雪松等^[39]得出模型在中尺度长期连续径流和泥沙负荷模拟中具有较好的适用性;陈军锋、陈秀芳等^[40-41]应用 SWAT 模型揭示了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;朱利和张万昌^[42]研究了气候变化对 SWAT 模型水文响应的影响,结果指出降水增加或气温降低都会导致径流增加,而降水增加或气温增加都会导致实际蒸发的增加。

万超和张思聪^[43]利用 SWAT 模拟潘家口水库的非点源污染,分析了上游流域面源污染负荷的产出特性,并且研究了农作物不同施肥方式下对面源污染负荷变化的影响;郝芳华等^[44]应用 SWAT 模型对官厅水库的非点源污染进行了定性分析和定量计算,得出非点源污染负荷与降水量成正比。

李硕等^[45-46]在遥感和 GIS 的支持下,对 SWAT 模型的空间离散化和空间参数化进行了深入研究,并成功地将其应用到江西湓水河流域的径流和泥沙的模拟中;任希岩等^[47]研究表明 DEM 分辨率对亚流域的面积或个数提取影响不大,但对坡度值的提取影响较大,因此,在进行流域产流、产沙模拟时,应进行坡度订正。郝芳华等^[48]和张雪松等^[49]研究了降雨的空间分布不均匀性对模型输出的影响,结果表明模拟的产流量和产沙量的不确定性大于降雨的不确定性,雨量站密度、雨量站分布和降雨空间分布变化均对模拟结果有着较大的影响;

为了推动该模型在中国的适应性研究及应用,必须对 SWAT 模型进行改进以提高模型的模拟精度。张东等^[50]针对模型在中国西北寒旱区的黑河流域和中西部湿润的汉江流域的水文模拟中发现的问题进行了扩充和改进,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,结果表明利用改进后的模型,不仅模型的使用效率有明显提高,而且改进后模型的效率系数和相关系数也比改进前有较大改善;中国科学院地理科学与资源研究所结合内蒙古河套灌区浅层地下水动态变化的生态环境效应研究,通过对国际上著名的 CERES 作物模型、SWAT 模型、MODFLOW 地下水动力学模型的融合、集成和功能扩

展,成功研制出分布式生态水文学模型 SWATMOD. 2 K4 (SWATMOD2004)*。

4 模型的存在问题及未来研究方向

4.1 存在的问题

SWAT 模型是针对北美的土壤、植被和流域水文结构来设计的,模型自带的数据库标准与世界其它国家数据库标准不一致,限制了模型的使用效率。模型采用了国外先进的概念性或经验性公式来描述不同的水文物理过程,但是可能出现经验公式在实际应用效果不好或模拟精度不高的问题。模型参数收集包括驱动所需的站点气象参数、土壤属性数据以及土地利用实时变化等观测不全或难以获取,也大大地限制了模型的使用。

模型输入参数如气象数据、土地覆盖变化及 HRU 子流域划分对模型的水文模拟精度存在较大的影响,因此参数校准和验证是影响模型模拟精度的关键因子之一。

4.2 未来研究方向

4.2.1 模型参数简化、模型参数的不确定性研究

水文模型参数越多可以增加对水文物理过程的解释,但是有研究表明并不是参数越多模型就越模拟越精确,而且繁冗的参数获取也是水文模拟中最大的问题之一;空间参数的率定校准和验证也将是 SWAT 模型的重要研究之一。

4.2.2 与 RS、GIS 的结合研究

SWAT 模型机理非常复杂,数据要求严格,当前 RS 和 GIS 技术正迅猛发展,RS 和 GIS 在水文模型研究中正越来越

体现出他们的优点,他们可以快速提供水文模拟大量的空间参数数据,从而可以节省大量的数据收集时间,快速地预测水文状况。

4.2.3 水文尺度问题的研究

水文尺度问题是水文系统在不同尺度之间转换时所遇到的问题。从目前国内外 SWAT 模型的应用研究显示,尺度多为中小尺度为主,尽管 SWAT 模型初始以大尺度流域水文模拟而设计的。如何将小尺度上建立的基本理论和水文参数延用至中大尺度的水文过程模拟,是目前水文科学研究的焦点和最有挑战的问题之一。

5 结 语

SWAT 模型自开发以来,以强大的功能、先进的模型结构以及高效的计算,在世界各国的水文模拟、非点源污染研究和流域水文管理中得到了广泛而成功的应用;同时随着模型的使用,也发现模型在实际应用模拟时也存在一定的问题,因此使用者在实际应用时根据流域实际状况,对模型的组件加以改进并且增加与其它模型的联合应用,从而更加确切地反映当地流域特征;SWAT 模型输入参数的获取和参数率定、自动化校准和验证也是模型研究的热点之一;SWAT 模型近几年在国内也得到了广泛的应用研究,研究涉及水文、非点源污染和模型的参数获取以及模型的改进,我国研究者应该根据研究目的和流域自然特征对模型加以改进以更好地服务于水资源管理和水土保持工作。

参考文献:

- [1] 赵人俊. 流域水文模拟 - 新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [2] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint of a physically - based digitally simulated hydrological response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9:237 - 258.
- [3] 杨大文,李翀,倪广恒,等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1):143 - 154.
- [4] 刘昌明,李道峰,田英,等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5):437 - 445.
- [5] 樊明兰. 基于 DEM 的分布式水文模型在中尺度径流模拟中的应用研究[D]. 成都:四川大学, 2004.
- [6] 孙友波. 基于 DEM 的水文特征信息的提取和可视化的研究与实现[D]. 北京:首都师范大学, 2005.
- [7] 张珂. 基于 DEM 栅格和地形的分布式水文模型构建及其应用[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [8] 郭太英. 基于 DEM 的分布式水文模型的研究与应用[D]. 大连理工大学, 2005.
- [9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool's theoretical documentation, version 2000 [R]. TWRI report TR - 191, Texas :Texas Water Resources Institute, College Station, 2002a.
- [10] 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.
- [11] Griensven A V, Meixner T, Grunwald et al. Evaluation of models using SWAT2005[EB/OL]. The Third International SWAT Conference, 45, <http://www.brc.tamus.edu/swat/apps.html>.
- [12] Griensven A V, Bauwens W. Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin[J]. Hydrological Processes, 2005, (19):827 - 838.
- [13] Krysanova V, Muller - Wohlfeil D I, Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological/ water quality model for mesoscale watersheds[J]. Ecological Modelling, 1998, 106:261 - 289.
- [14] Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basinwide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south central Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1999, 214:179 - 196.
- [15] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT - G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10):641 - 644.
- [16] McKeown R A, Gordon P, Arnold J G. Modifications of the Soil Water and Assessment Tool (SWAT - C) for stream flow modeling in a small, forested watershed on the Canadian Boreal Plain [EB/OL]. The Third International SWAT Conference, 46, <http://www.brc.tamus.edu/swat/apps.html>.
- [17] Gassman P W. The I_SWAT Software Package: A Tool for Supporting SWAT Watershed Applications [EB/OL]. The Second International SWAT Conference, 229 ~ 236, <http://www.brc.tamus.edu/swat/apps.html>.
- [18] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois Watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176:57 - 77.
- [19] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical

- region using a physical process based model[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1 - 4): 62 - 72.
- [20] Romanowicz A A, Vancllooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 187: 261 - 289.
- [21] Badas M G, Sulis M, Deidda R et al. Evaluation of SWAT Streamflow Components for the Araxisi Catchment (Sardinia, Italy) [EB/OL]. The Second International SWAT Conference. 27 ~ 32. <http://www.brc.tamus.edu/swat/apps.html>.
- [22] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169: 25 - 38.
- [23] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 497 - 507.
- [24] Kang M S, Park S W, Lee J J, et al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 2006, 79(1): 72 - 92.
- [25] Neitsch S L, Arnold J G, Srinivasan R. Pesticides Fate and Transport Predicted by the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [R]. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, USDA - ARS Blackland Research Center, TAES, Temple, Texas, 2002.
- [26] Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Technical Report. 2004[R/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/apps.html>.
- [27] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 306: 127 - 145.
- [28] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 645 - 654.
- [29] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO_3 - N loads predictions [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 207 - 222.
- [30] Jha M, Gassman P W, Secchi S 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.
- [31] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution - based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural non-point source pollution model [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 295: 211 - 224.
- [32] Tripathi M P, Panda P K, Raghuvanshi N S. Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(3): 365 - 379.
- [33] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251: 103 - 109.
- [34] Pandey V K, Panda S N, Sudhakar S. Modelling of an Agricultural Watershed using Remote Sensing and a Geographic Information System[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 331 - 347.
- [35] Fontaine T A, Cruickshank T S, Arnold J G, et al. Development of a snowfall - snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 262: 209 - 223.
- [36] Singh J, Knapp H V, Arnold J G, Demissie M. Hydrological Modeling of the Iroquois River Watershed using HSPF and SWAT[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(2): 343 - 360.
- [37] 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.
- [38] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟 - 以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例 [J]. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 29 - 32.
- [39] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究 [J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 38 - 42.
- [40] 陈军锋, 陈秀万. 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): 265 - 270.
- [41] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 833 - 836.
- [42] 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.
- [43] 万超, 张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算 [J]. *水力发电学报*, 2003(2): 62 - 68.
- [44] 郝芳华, 孙峰, 张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 385 - 386.
- [45] 李硕, 孙波, 曾志远, 等. 遥感和 GIS 辅助下流域空间离散化方法研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 183 - 189.
- [46] 李硕, 孙波, 曾志远, 等. 遥感和 GIS 辅助下流域养分迁移过程的计算机模拟 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 278 - 282.
- [47] 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.
- [48] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 446 - 453.
- [49] 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.
- [50] 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.