

SWAT 模型研究应用进展

庞靖鹏¹, 徐宗学¹, 刘昌明^{1, 2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:利用数学模型来分析非点源污染空间分布是评估非点源污染控制中特定管理措施和管理情景效果的重要工具,也是研究环境变化条件下水资源管理问题的重要手段。20 世纪 70 年代以来,随着人们对非点源污染的重视,产生了很多优秀的非点源模型,SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 就是其中之一。SWAT 模型具有综合、分布、基于物理机制并且与 GIS 集成的特征,具备准确模拟流域水文状况的能力,并已在水资源和环境领域中得到广泛的承认和普及。介绍了 SWAT 模型的特点和主要应用,对其在非点源污染模拟和控制、环境变化对水文响应的影响、洪水短期预报等领域的最新进展进行了评述,并对我国在应用 SWAT 模型方面的发展方向进行了初步探讨。

关键词:SWAT; 水文模型; 非点源; 进展; 非点源; 污染

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)03-0031-05

SWAT Model Application : State-of-the-Art Review

PANG Jing-peng¹, XU Zong-xue¹, LIU Chang-ming^{1, 2}

(1. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of

Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract:Mathematical model is an important tool for analyzing the spacial distribution of nonpoint source pollution and assessing the impact of specified management practice. It is also an important way to investigate water resources management on the condition of environmental change. Since the 1970s, with the strengthening of attention paid by public on nonpoint source pollution many nonpoint source models were developed. SWAT (Soil and Water Assessment Tools) is one of these models and was developed at the beginning of 1990s. As a kind of integrated, distributed and physically-based model, SWAT is integrated with GIS and has the ability to simulate hydrological conditions accurately in watersheds. The model has obtained wide acceptance and popularity in the fields of water resources and environmental sciences. The development of SWAT model and its advances on application in the fields of simulation and control for nonpoint source pollution, the impact of environmental change on hydrologic response, and real-time flood forecasting were reviewed. In order to use SWAT well, the main issues to use SWAT model in China is also discussed.

Key words:SWAT; hydrologic model; advance; nonpoint source; pollution

人类对水文系统最重要的影响是由土地利用变化所引起的,如果这种变化发生在一个流域的大片区域或者关键地区,会对径流过程产生短期或长期的影响,包括增加下游洪水泛滥的可能性以及减少深层和浅层地下水的补给^[1]。在城市化区域,不透水表面和工程排水系统会增加洪峰流量和降低水质,从而使供水问题变得更加复杂^[2]。非点源威胁着农业可持续发展并被认为是地表和地下饮用水源的最大威胁,然而农业生产活动是全球非点源污染最主要的原因,全世界有 30%~50% 的地表已经受到非点源污染物的影响^[3]。在地方、地区和全球尺度上评价农业管理措施对非点源污染的影响已经成为取得农业可持续发展,减缓有害的环境影响策略的关键组成部分^[3]。数学模拟是用来分析非点

源污染空间分布规律最好的技术方法之一,也是评估非点源污染控制中特定最优管理措施 (Best Management Practice, BMP) 效率和特定管理情景效果的重要工具^[4]。

诸如非点源污染控制等复杂的流域管理问题需要预测不同的管理方案下流域的响应。这些方案在决策的空间(如流域)和时间水平(如轮作)上可能存在差异。因此,对土壤、土地利用、地形特征和天气参数等环境变量的表达是正确模拟空间上不同的管理情景的基本条件。此外,为了评价流域管理措施的长期影响,要求模型能在确定的时间范围内对流域行为进行连续模拟。而集总式和基于事件的模型对诸如非点源污染控制这样极为复杂的问题几乎无能为力。要有效地控制非点源污染需要一种能够描述土地管理中时间和

* 收稿日期:2006-06-20

基金项目:北京市科技计划项目(D0704004040191)

作者简介:庞靖鹏(1976-),男,博士研究生,研究方向为水资源与水环境。

空间差异,具有长期连续模拟能力的分布式水文模型。

本文论述了国外 SWAT 模型研究领域的最新进展和我国的研究情况,通过二者的对比,可以把握 SWAT 模型的研究前沿,对我国引入 SWAT 模型进行非点源污染研究和水资源管理起到一定的参考和借鉴作用。

1 模型概述

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型^[5:6],由美国农业部农业研究中心(USDA - ARS)开发。它主要形成于 SWRRB^[7],并且吸取了 CREAMS^[8]、GLEAMS^[9]、EPIC^[10]和 ROTO^[11]的主要特征。SWAT 模型用来协助水资源管理,即预测和评估无测站流域内水、泥沙和农业化学品管理所产生的影响。它由 8 个部分组成:水文、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、营养物质和农业化学品。

SWAT 模型是 90 年代初开发的,并很快在水资源和环境领域中得到广泛承认和普及。Bera et al.^[12]称之为是在农业和森林为主的流域具有连续模拟能力的最有前途的非点源模拟模型。SWAT 模型开发的目的是预测大尺度、无测站流域水、泥沙和农药管理的影响,因此它具备^[5]:不需要率定(在无测站站点率定是不可能的);对大流域采用易获得的输入数据;对大流域的计算效率高;连续模拟,能够模拟长期管理变化的影响。Romanowicz et al.^[13]认为 SWAT 模型还具有:综合的水文模型,模拟定量和定性的水文平衡项;以 ARCVIEW 为界面,便于空间分布信息的预处理和后处理;可以模拟分布式参数变化所带来的影响;模型可以直接下载,软件的开发者和用户通过邮件和网上讨论来对其进行改进和提高。

SWAT 模型从开发至今经历了数次较大的改进,目前正式的版本为 SWAT 2000。对于历次的改进在《SWAT 理论文件》^[14]中已经详细地介绍,不作赘述。在 SWAT 2003 版中增加了敏感性分析和自动率定和不确定性分析模块。敏感性分析采用 LH - OAT 方法,该方法是由 Morris^[15]提出的,它结合了 One-factor-At-a-Time (OAT) 分析法与 Latin Hypercube 采样^[16]技术,从而具有全局分析法和局部分析法二者的长处。其优点是确保所有的参数在其取值范围内均被采样,并且明确地确定哪一个参数改变了模型的输出,减少了需要调整的参数数目,提高了计算的效率^[17:18]。

SWAT 模型的最新版本为 SWAT2005,该版本还没有公开发布,其主要特征是对以前版本一些错误的纠正,值得一提的是增加了日以下步长的降水量生成器并允许用户定义天气预测期^[19]。前者对于为 SWAT 模型的短期预报打下了基础。后者允许用户在模拟降水时,预测期之前降水采用多年平均值而预测期降水采用预测期平均值来模拟,这种改进对评价流域内预测天气的影响非常有用,如预知近期暴雨的影响可以提早对水库进行合理的调控。

SWAT 模型有一定的适用范围,在具体应用时要进行改进和提高,目前其主要的改进形式有 SWIM^[20]、SWAT-MOD^[21]、SWAT - G^[22,23]和 E - SWAT^[24]等。SWIM 模型开发目的是为中尺度流域(100 ~ 10 000 km²)水文和水质模拟提供一个综合性的工具。它基于 SWAT 模型和 MATSALU 模型^[25],并且与 GRASS 集成。MATSALU 模型具备的三种层次流域分解方法和 N 模块,使集成后的 SWIM 模型在区域尺度上更易应用并且增强了水质模拟的能力。由于 SWAT 模型在地下水模块采用的是集总式的,因此 Krysanova et al.^[26]结合了 SWAT 模型和 MODFLOW 模型的长处,开发出 SWATMOD 模型,应用于美国 Kansas 的 Rattlesnake Creek 流域。Eckhardt et al.^[22]在研究德国中部低山地区时,基于研究区域主要为陡坡和浅层土壤含水层覆盖在坚硬的岩石上,地下水对径流的贡献相对较小,产流形

式以壤中流为主的特点,修正了 SWAT 模型中渗透和壤中流的计算公式,开发出了 SWAT - G 模型。Van Griensven et al.^[27]在研究比利时的 Dender 流域时,把 Qual2E^[28]模型集成到 SWAT 中,增强了 SWAT 模型的水质模拟功能,开发出了 ESWAT 模型。

2 研究进展

为了更好地论述 SWAT 模型的发展,本文选出 12 个具有代表性的 SWAT 模型应用实例,见表 1。这 12 个实例覆盖了 SWAT 模型在不同地域、不同空间尺度、不同时间步长条件下的模型率定和验证、模型改进以及模型的应用等各个方面。

2.1 非点源污染模拟和控制

农业是非点源污染的主要污染源,用来减小农业生产活动产生的非点源污染的主要方法是采用最优管理措施。在流域内的几个关键区域通常产生巨大的和不成比例的污染负荷^[40]。由于这些关键的区域或污染源对水质所构成的威胁与它们的面积不成比例,需要按照优先次序来识别和治理对水资源最为不利的污染源。通过治理较少的污染源来获得同样的效果,会加快水资源的恢复过程并节省时间和资金,确保可用的资源发挥最大效力。

SWAT 模型不仅可以模拟非点源污染负荷,而且可以对非点源污染关键区进行识别,并建立不同的管理情景来评价不同的最优管理措施的效果。Santhi et al.^[30]和 Bouraoui et al.^[38]分别对美国 Bosque 河流域和土耳其的 Medjerda 河流域进行了情景模拟,见表 1。Santhi et al.^[41]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,来评价执行该规划对非点源污染的长期影响。Tripathi et al.^[34]和 Behera et al.^[39]分别对印度 Nagwan 流域和 Kapgari 流域的非点源污染关键区进行了识别,见表 1。

2.2 环境变化对水文响应的影响

气候变化和人类活动对土地利用/覆盖变化(LUCC)等流域水文循环产生显著影响。SWAT 模型可以通过输入日气象数据或通过“天气发生器”根据多年逐月气象资料来模拟逐日气象数据,因此可用于气候变化条件下水文响应的研究。Van Liew et al.^[33]在对美国 Little Washita 流域不同气候条件下进行水文模拟均取得了较好的效果,见表 1。SWAT 模型本身不具备预测 LUCC 的能力,因此需要预先设计或采用其它模型生成 LUCC 情景。PorLand^[42]模型是农业经济模型,可以预测特定自然、经济和政治条件下土地利用变化,其生成的土地利用图可以作为 SWAT 模型的输入。Weber et al.^[31]和 Lenhart et al.^[35]分别在德国 Aar 河流域和 Dill 流域应用 SWAT 模型对由 PorLand 模型生成不同的土地利用情景进行了模拟,见表 1。ASM^[43]也是一种农业生产模型,Attwood et al.^[44]利用其生成的作物组合和管理情景模拟了在美国 Texas 发展 5 个新的作物品种后径流量、泥沙、N 和 P 负荷的变化。

2.3 洪水短期预报

降水是流域内所有水文过程的驱动力,它具有空间和时间上的差异,在进行模拟时如果能对这种差异更好地表达无疑可以提高模拟的效果。当前大多数的水文研究用的降水数据基本上来自于雨量站。但是,受雨量站网分布所限往往不能对流域内的降水分布情况很好地表达^[45]。另一种降水信息的来源是气象雷达,诸如美国国家气象局的下一代气象雷达(Next Generation Weather Radar, NEXRAD),也称之为气象监视雷达 - 1988 Doppler (WSR - 88D)。气象雷达采用遥感技术,通过发送和接收电磁信号来估算降水数据,相对雨量站网来说具有更高的空间和时间分辨率。

表 1 SWAT 模型应用总结				
流域	模型率定	模型验证	BMPs 或者其它用途	评论
conterminous U. S. [29]	None	20 年,各州平均年径流, r^2 为 0.78 ($b=0.95$);78863 个 STATSO 土壤分类多边形内产生的平均年径流, r^2 为 0.66 ($b=1.01$)	None	表明大尺度的水文平衡可以采用连续模型模拟
North Bosque River Watershed in U. S. [30]; 4, 277 km ²	Hico 站点,月流量、泥沙量、有机 N、有机 P、无机 N 和无机 P 的 E_{NS} 为 0.58~0.80, r^2 分别为 0.60~0.81。Valley Mills 站点略	Hico 站点,1998 年,月流量、泥沙量、有机 N、有机 P、无机 N 和无机 P 的 E_{NS} 为 0.70~0.87	4 个情景来模拟不同的 BMP 下无机 P 污染负荷	SWAT 能够预测流量、泥沙和营养物并用来模拟不同的管理情景的影响
Aar River in Germany [31]; 59.8 km ²	已率定,可参见 (Fohrer et al., 1999)	日径流 r 和 E_{NS} 分别为 0.80 和 0.63	SWAT 模块用来计算水文平衡项	农业经济模型 ProLand、生态模型 ELIA 和水文模型 SWAT 集成,研究土地利用变化对景观结构和功能的影响
Dender River in Belgium [27]; 1 384 km ²	日流量,1986~1987, E_{NS} 为 0.86	日流量,1988~1989, E_{NS} 为 0.88	对温度、BOD 和 O ₂ 等水质指标进行模拟	采用 ESWAT (Extended SWAT) 模型,增加了 QUAL2E 水质模块
Dietzholze catchment in German [32]; 81 km ²	采用 SWAT99.2, E_{NS} 为 -0.17;采用 SWAT - G, E_{NS} 为 0.76	None	None	开发出 SWAT - G 模型,对 SWAT 模型进行改进,使之可以更好地适用于低山地区
Little Washita River experimental Watershed in U. S. [33]; 610 km ²	LWREW - 526 和 LWREW - 550 (集水区面积分别为 160 和 538 km ²),日径流量 E_{NS} 分别为 0.60 和 0.40	LWREW - 522 (流域出口),对三个时段进行率定,分别代表干、平均和湿三种气候条件,日 E_{NS} 分别为 0.55、0.59 和 -0.06。LWREW - 526 和 LWREW - 550 略	None	在此流域上 SWAT 具备针对不同的气象条件下进行水文研究的能力
Nagwan watershed in India [34]; 90.23 km ²	已率定,未说明	日径流和泥沙量, D_V 分别为 4.6% 和 14.3%, r^2 分别为 0.91 和 0.89, E_{NS} 分别为 0.87 和 0.89; 日有机 N、TP、NO ₃ ⁻ N 和可溶解 P, D_V 分别为 15.8%、11.7%、3.7% 和 12.5%; r^2 分别为 0.82、0.86、0.89 和 0.82	非点源污染关键区的确定	SWAT 模型在小的农业流域模拟效果好,可用于非点源关键区识别
Dill catchment in Germany [35]; 692 km ²	Asslar 站点 (流域出口),日泥沙量、TN 和 TP, E_{NS} 分别为 0.56、0.42 和 0.26; r^2 分别为 0.83、0.73 和 0.78	Asslar 站点 (流域出口),日泥沙量、TN 和 TP 分别为 0.74、0.77 和 0.09; r^2 分别为 0.89、0.88 和 0.58	对 ProLand 模型生成的 9 个土地利用情景进行模拟	通过三个子流域对日流量进行率定和验证,把确定的 3 个参数集合成一个最优参数集应用于整个流域
Vantaanjoki catchment in Finland [36]; 1680 km ²	Hanala 站点 (集水区面积 295 km ²),日流量、TP 和 TN 的 E_{NS} 分别为 0.81、0.59 和 0.74	Outlunkyla 站点 (流域出口),日流量、TP 和 TN, E_{NS} 分别为 0.66、0.51 和 0.44。其它三个站点略	计算了流域中 N 和 P 的滞留	通过与传统的统计方法对比,验证了 SWAT 的预测准确性
Blue river watershed in U. S. [37]; 1233 km ²	1994~2000,24 次降雨事件,除了 2 次 E_{NS} 较低外都超过 0.72	None	None	采用 NEXRAD 降雨数据和公式化的率定方法,以改善小时步长的 SWAT 模拟
Medjerda river basin in Tunisia [38]; 16000 km ²	Fernana, Raiar 和 Sidi Mediene 站点,月流量, E_{NS} 范围 0.31~0.65	Bou Salem 站点 (流域出口),日流量, E_{NS} 和 r^2 分别为 0.23 和 0.44; 其它三个站点略	通过 2 个情景来模拟不同管理措施对水质的影响	对水流的模拟效果很好,由缺少详细的降水资料和水库管理信息,降低了对水质的模拟效果
Kapgarı watershed in India [39]; 9.73 km ²	日径流量、泥沙量、NH ₃ ⁻ N 和 TP 的 r^2 为 0.92~0.94; E_{NS} 为 0.83~0.92	日径流量、泥沙量、NH ₃ ⁻ N 和 TP 的 r^2 为 0.87~0.94; E_{NS} 分别为 0.83~0.89	确定非点源污染关键区及 BMPs	对关键区采取 BMPs 会有效控制非点源污染

注: E_{NS} - Nash - Sutcliffe 系数; r^2 - 确定性系数; r - 相关系数。

Moon et al. [46] 对美国 Trinity 河流域应用 NEXRAD 数据进行了模拟; Di Luzio et al. [37] 对美国 Blue 河流域采用 NEXRAD 降雨数据和格式化率定方法模拟了 24 次降雨事件小时水文过程,向着改善 SWAT 模型小时步长的模拟能力做了尝试,见表 1。随着 3S 技术的发展,对雷达信息的分析处理能力和效率将不断地得到提高,最终必将实现洪水的短期实时预报。

2.4 国内研究进展

国内学者对 SWAT 模型数据精度和子流域划分阈值对模型输出影响、数据预处理以及率定等进行了多方面的探讨。敖芳华等 [47; 48] 分析了黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域亚流域划分数量以及土地利用变化和降雨的空间不确定性对模拟产流量和产沙量的影响。张东等 [49] 在对汉江褒河上游江口流域进行水文模拟时增加了 SWAT 模型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,从而使模型的使用效率显著增加。

在 SWAT 模型对我国不同地区的适用性方面,王中根等 [50] 在黑河干流山区莺落峡以上流域模拟中认为 SWAT 在结构上考虑了融雪和冻土对水文循环的影响,适用于我国西北寒区。黄清华等 [51] 在黑河干流山区流域模拟中认为 SWAT 模型通过率定能够较好地模拟高海拔山区流域多水源径流的水文过程。

对于 SWAT 模型在大尺度流域上的应用方面,刘昌明等 [52] 对黄河河源区流域进行了水文模拟,流域面积达 42.8 万 km²,为目前国内之最,对于空间大尺度不同土地覆盖和不同气候条件下的情景模拟,模拟结果表明气候变化是引起黄河河源区径流变化的主要原因。

此外,万超等 [53] 对潘家口水库上游化肥施用水平不同管理情景进行模拟,对非点源污染负荷进行计算,并认为合理施肥对减少非点源有重要意义。陈军峰等 [54] 对长江上游的梭磨河流域土地利用变化对径流变化的影响,通过 SWAT 模型与集总式水文模型 CHARM 运行结果比较,前者误差较小。

从整体上看,国内对 SWAT 的应用逐渐走向成熟,但是由于数据缺乏、数据精度低等原因,对日尺度的预测效果不是很好,对于营养物质的模拟也很少。

3 结 语

由于我国农业管理的集约化水平很低,由农业引起的非点源污染情况非常严重,在一些地方非点源污染已上升为威胁饮用水源的主要原因。在此背景下,近几年来非点源污染研究已经成为我国环境界的一个研究热点。

SWAT 模型目前主要有与 ARCVIEW 和 GRASS 紧密集成两种方式,通过集成 SWAT 模型空间数据输入效率、模

拟输出显示和模型运行效率因集成而大大提高,为非点源研究、环境变化条件下水文响应研究和水资源管理等提供了强大的平台。但是我国应用 SWAT 模型还存在诸多问题。SWAT 模型的构建需要大量的数据支持,在发达国家这些数据一般都可以免费得到,而我国对非点源污染的研究起步较晚,缺乏非点源污染完善的监测机制和制度,数据资料不完备,共享程度低,从而制约了我国非点源污染问题的研究。因此,除了对 SWAT 模型本身进行改进之外,加强对非点源污染的重视,完善我国非点源污染监测机制和制度,提高基础数据的共享水平,才能让 SWAT 模型更好地为决策服务。

参考文献:

- [1] Bhaduri, B, Harbor, J, Engel, B, et al. Assessing watershed - scale, long-term hydrologic impacts of land - use change using a GIS - NPS model[J]. Environmental Management, 2000, 26(6): 643 - 658.
- [2] Schueller. The importance of imperviousness[J]. Watershed Protection Techniques, 1994, 1(3): 100 - 111.
- [3] Tsihrintzis, V A, Hamid, R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: A review[J]. Water Resources Management, 1997, 11(2): 137 - 164.
- [4] Heng, H H, Nikolaidis, N P. Modeling of nonpoint source pollution of nitrogen at the watershed scale[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(2): 359 - 374.
- [5] Arnold, J G, Williams, J R, Srinivasan, R, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73 - 89.
- [6] Neitsch, S L, Arnold, J G, Kiniry, J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000 [M]. College Station: Texas Water Resources Institute, 2002.
- [7] 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.
- [8] Knisel, W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems [R]. Conservation Research Report No 26. 1980.
- [9] Leonard, R A, Knisel, W G, Still, D A. GLEAMS: GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1403 - 1418.
- [10] Williams, J R, Jones, C A, Dyke, P T. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions - American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(1): 129 - 144.
- [11] Arnold, J G, Williams, J R, Maidment, D R. Continuous - time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE, 1995, 121(2): 171 - 183.
- [12] Bera, M, Borah, D K. Watershed-scale hydrologic and nonpoint - source pollution models: Review of mathematical bases[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(6): 1553 - 1566.
- [13] Romanowicz, A A, Vanclooster, 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(1): 27 - 39.
- [14] Neitsch, S L, Arnold, J G, Kiniry, J R, et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual[M]. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002.
- [15] Morris, M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161 - 174.
- [16] McKay, M D, Beckman, R J, Conover, W J. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239 - 245.
- [17] Holvoet, K, van Griensven, A, Seuntjens, P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(8 - 10): 518 - 526.
- [18] Griensven, A v, Meixner, T, Grunwald, S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi - variable catchment models[J]. Journal of Hydrology. In Press.
- [19] Neitsch, S L. Differences between SWAT2000 and SWAT2005[Z]. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2005.
- [20] Krysanova, V, Muller - Wohlfeil, D I, Becker, A. Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds[R]. PIK Report No. 18. Potsdam, Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK).
- [21] Sophocleous, M A, Koelliker, J K, Govindaraju, R S et al. Integrated numerical modeling for basin - wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south - central Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1 - 4): 179 - 196.
- [22] Eckhardt, K, Arnold, J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(1 - 2): 103 - 109.
- [23] 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.
- [24] Fohrer, N, Eckhardt, K, Haverkamp, S, et al. Effects of land use changes on the water balance of a rural watershed in

- a peripheral region [Auswirkungen von landnutzungsänderungen auf den wasserhaushalt eines landlichen einzugsgebiets in einer peripheren region][J]. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 1999, 40(5 - 6):202 - 206.
- [25] Krysanova, V, Meiner, A, Roosaare, J, et al. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed[J]. Ecol Modelling, 1989, 49(1 - 2):7 - 29.
- [26] 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(2 - 3):261 - 289.
- [27] Van Griensven, A, Bauwens, W. Integral water quality modelling of catchments[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(7):321 - 328.
- [28] Brown, L C, Barnwell, J T O. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E- UNCAS: Documentation and User Model[M]. Washington: USEPA, 1987.
- [29] Arnold, J G, Srinivasan, R, Muttiah, R S, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(5):1037 - 1051.
- [30] Santhi, C, Arnold, J G, Williams, J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and non-point sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5):1169 - 1188.
- [31] Weber, A, Fohrer, N, Moller, D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio - economic factors —effects on landscape structures and functions[J]. Ecological Modelling, 2001, 140(1 - 2):125 - 140.
- [32] 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, Parts A/B/C, 2002, 27(9 - 10):641 - 644.
- [33] Van Liew, M W, Garbrecht, J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2):413 - 426.
- [34] Tripathi, M P, Panda, R K, Raghuwansi, 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.
- [35] Lenhart, T, Fohrer, N, Frede, H G. Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2003, 28(33 - 36):1301 - 1309.
- [36] 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(1):25 - 38.
- [37] Di Luzio, M, Arnold, J G. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input[J]. Journal of Hydrology, 2004, 298(1 - 4):136 - 154.
- [38] 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, Parts A/B/C, 2005, 30(8 - 10):497 - 507.
- [39] 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 and Environment, 2006, 113(1 - 4):62 - 72.
- [40] Chu, Tzyy - Woei. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in Piedmont physiographic region[D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2003.
- [41] 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, In Press, Corrected Proof.
- [42] Moeller, D, Kuhlmann, F. ProLand: A New Approach to Generate and Evaluate Land Use. [R]. European Congress of Agricultural Economists. Warsaw, Poland, 1999.
- [43] Chang, C C, McCarl, B A, Mjelde, J W, et al. Sectoral implications of farm program modifications[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1992, 74:38 - 49.
- [44] Attwood, J D, McCarl, B, Chen, C C, et al. Assessing regional impacts of change: linking economic and environmental models[J]. Agricultural Systems, 2000, 63(3):147 - 159.
- [45] Jayakrishnan, R, Srinivasan, R, Santhi, C, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3):749 - 762.
- [46] Moon, J, Srinivasan, R, Jacobs, J, H. Stream flow estimation using spatially distributed rainfall in the Trinity River Basin, Texas[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2004, 47(5):1445 - 1451.
- [47] 郝芳华. 流域非点源污染分布式模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学环境学院, 2003.
- [48] Hao, F H, Zhang, X S, Yang, Z F. A distributed non-point source pollution model: calibration and validation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(4):646 - 650.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2):22 - 26.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 陈军锋, 李秀彬, 张明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(7):668 - 674.