

SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展

张蕾, 卢文喜*, 安永磊, 伊燕平, 李迪

吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026

摘要: 模型模拟是定量估算非点源污染负荷的有效工具, 也是对其进行规划、控制和管理的前提。近年来 SWAT 模型在国内外得到了快速的发展和广泛应用, 是目前全球评价大范围和环境变化条件下非点源污染问题的一个有效工具。简介 SWAT 模型的发展历程及原理, 概述了 SWAT 模型目前在国内外的水文评价、污染物流失模拟、输入参数、土地利用及气候变化对水文响应的影响等方面的研究现状, 并对 SWAT 模型的发展方向提出了建议, 为模型的进一步完善与应用提供参考。结果显示, SWAT 模型对水文评价(如径流量、泥沙量)可得到较好的模拟和预测结果, 能够模拟污染物(如农药和化肥)在农田和河网中的迁移过程, 模拟与分析土地利用/覆被变化及气候变化对水文过程的影响。模型参数的确定及其对地下水流与溶质运移的模拟是模型的主要问题, 需要进一步研究与完善。

关键词: 水土评价模型(SWAT); 非点源污染; 应用进展

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5906 (2009) 06-2387-06

随着点源污染得到了有效治理和控制, 由非点源污染引起的水体污染问题日益突出, 全球有 39% 的河流, 45% 的湖泊, 51% 的河口受到非点源污染的影响^[1], 非点源污染已成为水质恶化的重要源头。对非点源污染进行定量化的最直接有效的途径就是数学模拟。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)历经近 30 年开发的一个适用于较大尺度流域的具有很强物理机制的长时段分布式水文模型。SWAT 模型集成了遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和数字高程模型(DEM)技术, 能有效模拟和预测长期连续时间段内不同管理模式对大面积复杂流域的水、沉积物、营养物和农业化学物质输出的影响, 是非点源污染模拟的有效工具。许多文献^[2,3]都已经报道了 SWAT 模型在水文和水资源评价方面(如地下水、土壤水、融雪和水管理, 土地利用和土地管理变化、农业最佳管理措施, 气候变化等)的成功应用, 且适用于实测资料相对缺乏的地区, 目前在国内外得到了广泛应用。但我国近几年才开始引进 SWAT 模型, 对模型的基础性研究非常薄弱。因此, 对 SWAT 模型在国内外的研究成果进行总结与讨论, 并对模型的适用性及缺点提出建议, 有利于模型的进一步发展与应用。

1 SWAT 模型的发展历程

SWAT 模型结合了 CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management

Systems) 模型, GLEAMS(Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)模型和 EPIC (Environmental Impact Policy Climate)模型等多个模型, 目前的 SWAT 模型是 SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)模型的直接产物^[4]。SWAT 模型的发展历程如图 1 所示。

2 SWAT 模型的原理

SWAT 允许模拟流域中许多不同的物理过程, 模拟的流域水文过程分为两个主要部分: 一个是陆面部分, 控制每个子流域主河道的水、泥沙、营养物和农药负荷等的输入量, 主要的组件包括: 天气、水文、土壤温度与性质、泥沙、作物生长、营养物、农药/杀虫剂、农业管理。另一个是水面或汇流演算部分, 决定水、泥沙、营养物及化学物质等通过流域的河网向出口的输移运动, 包括河道汇流演算和蓄水(水库、池塘/湿地)汇流演算两大部分。整个水分循环系统以水量平衡方程为基础:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

式中: SW_t 是时段土壤最终含水量, mm; SW_0 是时段土壤前期含水量, mm; t 为时间步长, d; R_{day} 是第 i 天降水量, mm; Q_{surf} 是第 i 天的地表径流, mm; E_a 是第 i 天的蒸发量, mm; W_{seep} 是第 i 天存在于土壤剖面地层的渗透量和侧流量, mm; Q_{gw} 是第 i 天地下水含量, mm。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40672157)

作者简介: 张蕾 (1983 年生), 女, 博士, 主要研究方向为水环境水生态与农田生态工程。E-mail: zhanglei1@yahoo.com.cn

*通讯联系人: 卢文喜

收稿日期: 2009-09-14

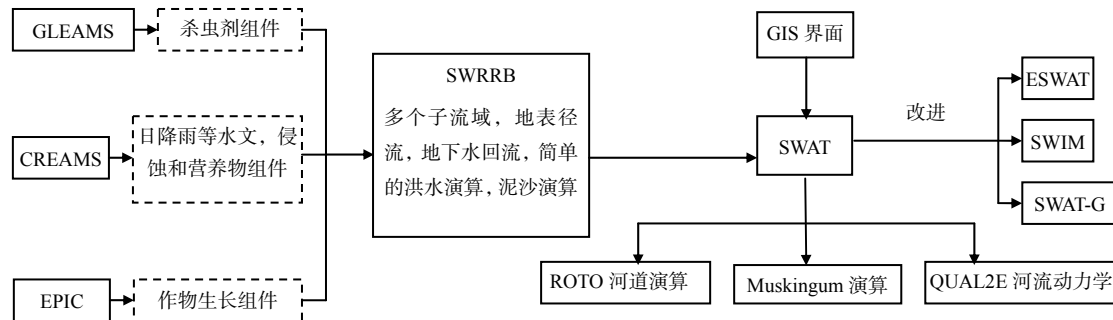


图1 SWAT模型的发展历程

Fig.1 Schematic of SWAT developmental history

3 SWAT模型的应用进展

目前SWAT模型现已在世界上包括美洲、欧洲、亚洲及非洲等国家得到了推广及应用，主要应用在水文评价、污染物流失、土地利用与气候变化的水文效应及输入参数对模拟结果的影响方面。下面就这几方面介绍SWAT模型在国内外的最新应用进展。

3.1 水文评价

Du等^[5]对SWAT模型进行了评价，并预测了Upper Oyster Creek流域在流量资料有限的情况下的连续日流量。Gessese和Yonas^[6]使用SWAT和CCHE1D泥沙输移模型评估了Legedadi水库泥沙流入量和沉积总量。结果发现计算值与测量值一致。Schneider等^[7]评估了在中国半干旱地区不同的复杂环境下的四个蒸散发方法(Priestley-Taylor, Penman-Monteith, Hargreaves和Makkink)，确定了这种环境下的最适蒸散发方法。Ahl等^[8]改进了SWAT模型，并模拟了位于Montana中部高海拔、森林覆盖率高、降水主要来自雪的Tenderfoot Creek的径流。结果表明，SWAT可对森林山地流域提供合理的年、月、日流量预测。Bärlund和Kirkkala^[9]测试了SWAT模型评估为满足地表水水质的目标而提出的管理办法的适用性。评估了SWAT模型在芬兰的环境条件下分析水分和营养物运输的有效性。Chaponniere等^[10]将SWAT模型应用于在数据缺少情况下的摩洛哥High Atlas半干旱山区流域，得到了较好的模拟结果。Immerzeel等^[11]用校准后的模型计算流域每月的水平衡并评估作物产水量和灌溉作物水分的利用率。结果发现，在集水区，蒸发是水流失的最大贡献者。Rostamian等^[12]应用SWAT估计Iran山集水区的径流量和泥沙量，由于山区的水文数据有限，采用了SUFI-2对模型进行校准和不确定性分析，结果发现，模型对径流的模拟结果要好于泥沙的模拟结果。

国内，张利平等^[13]、陈小凤^[14]都将SWAT模

型应用于白莲河流域。模拟结果表明，SWAT模型能够较好地模拟白莲河流域日径流过程，对中小流域具有一定的适用性。李晓等^[15]将SWAT模型应用于中国伊河流域潭头以上地区，并探讨了模型在中国半湿润半干旱地区的适用性。王中根等^[16]成功构建了海河流域分布式SWAT模型，并对模型的参数进行优化和灵敏度分析，结果表明，所建模型满足海河流域水资源综合管理的需求。罗慈兰^[17]应用SWAT模拟了房山区蒸散发(ET)，并将模拟结果与遥感ET数据进行对比分析。结果显示模拟相对误差在10%以内。

3.2 污染物流失

Luo等^[18]应用SWAT模型模拟加利福尼亚州Otestimba Creek农田流域两种有机磷农药(毒死蜱和二嗪农)的迁移转化。结果表明，SWAT能评价农药在农田和河网中的迁移过程。Bulut等^[19]使用AVSWAT调查了施肥率对磷(P)的运输和对Uluabat湖的磷负荷的影响。结果表明，当施肥量增加一倍时，Uluabat湖的磷负荷增加了32%；当化肥的使用量减少了20%、30%和50%时，磷运移到Uluabat湖的负荷下降了约6%、10%和16%。磷负荷和化肥施用率之间的线性相关性明显。Gevaert等^[20]侧重于农药管理情景的应用，对SWAT源代码作出了一些修改，准确预测了位于比利时中心的一个小流域运输到河流的农药负荷。Bouraoui等^[21]用SWAT来确定控制营养物流失的主要过程和途径。结果表明，地下水是流域中总硝态氮负荷的主要贡献者。

国内，范丽丽等^[22]以三峡库区大宁河流域为研究区域，应用SWAT模型进行了流域农业非点源污染负荷的模拟计算，分析了非点源污染空间分布特征，并提出了防治措施。李家科等^[23]以渭河华县断面以上流域为研究区，应用SWAT模型对该区域的径流、泥沙及氮污染负荷的产生与输出过程进行模拟计算，并进行了分析。王晓燕等^[24]利用SWAT模型对北京密云水库北部区

域进行了流域非点源污染模拟研究,模拟了非点源污染负荷的时空变化,以及不同土地利用类型对非点源污染流失负荷的影响。

3.3 土地利用/覆被变化

人类的土地利用是非点源污染的主要影响动因,土地利用/覆被变化能够改变流域蒸散发、下渗,土壤水文状况、地表径流以及地表覆盖的截留量,进而对流域的水量平衡产生重大影响,形成对流域的大面积非点源污染。因而,土地利用/覆被变化对非点源污染的影响越来越受到人们的重视。

Tong 等^[25]采用 SWAT 模型模拟了在当前和未来土地使用配置下的水质条件,分析了未来土地使用变化对水文过程的影响。结果表明,流域土地利用从农业为主转化为农村和混合住宅用地,检测到了流量、沉积物和营养物减少,但仍超过美国环境保护署建议的日上限值。Bhattarai 等^[26]评估了阿拉巴马州 Wiregrass 地区的一个小流域 1992 年和 2000 年间的土地利用变化对经济(农业和木材生产收入)及水质的影响。Schilling 等^[27]用 SWAT 模型评估了未来 LULC(Land Use/Land Cover)变化对爱荷华州中西部 Raccoon River 流域年度和季节水量平衡的潜在影响。模拟结果符合历史的观察资料。三个 LULC 变化情景模拟结果表明,提高玉米产量将减少年度 ET、提高水量及硝酸盐、磷和沉积物的流失,而增加多年生植物将增加 ET、减少水量和非点源污染物的流失。

国内,秦耀民等^[28]将 SWAT 模型应用于黑河流域,分析了其在黑河流域的适用性,在此基础上通过对不同土地利用情景下非点源污染负荷的量化分析,研究了土地利用-土地覆被变化对黑河流域非点源污染的影响过程。李宏亮^[29]以大清河山区流域为研究对象,通过设定不同情景土地利用/覆被方式,运用 SWAT 模型模拟分析了不同情景的变化对地表径流及蒸发量产生的影响,结果表明:当土地利用/覆被变化为所设定的优化模式时,径流系数明显下降;年径流变差系数变小,年际径流变化趋于稳定;涵养指数升高,河流枯季水量增加。蒸发量先是由于植被的作用提高了地面的供水能力而迅速增加,而后逐渐变得平稳。于磊等^[30]应用 SWAT 模型于漳卫南流域,设置了 4 种不同土地利用情景,定量分析了因土地利用变化对流域水循环的影响,结果表明:流域径流量、蒸发量、产水量等指标对土地利用的变化比较敏感。

3.4 气候变化

气候变化潜在的影响包括:水文过程的改变如降雨、蒸散发、土壤含水率、水温、径流量、洪水的发生频率,导致其他环境的改变如植物生长,沉积物和营养物进入水体,影响人类健康、农业生产和防洪能力、城市生活污水的供应、鱼及野生生物管理等。国内外的学者目前正积极的开展这方面的研究。

Dhar 和 Mazumdar^[31]对印度西孟加拉邦班库拉 Bankura 区的 Kangsabati 河流域进行了应用,预测了各种情况下的气候变化(蒸发量)对粮食生产,供水,生物多样性的可能影响。Ficklin 等^[32]用 SWAT 模型模拟了加利福尼亚州农业生产活动频繁的 San Joaquin 流域气候变化的水文响应,这项研究的结果表明,大气中的二氧化碳浓度、温度和降水的变化对水产量、蒸发量、灌溉水的利用和流量产生显著的影响。Somura 等^[33]应用 SWAT 模型研究气候变化对 Hii 河流域和 Shinji 湖下游的影响,研究了不同的气候情景下蒸发量、雪水当量、排入流域水量、湖泊盐度的变化。结果表明,气温是主要的影响因素,当情景温度上升时,ET 增加、雪水当量下降,特别是在冬季。Xu 等^[34]采用 4 个 GCMs(Global Climate Models),加拿大的 CGCM2,日本气候系统研究中心的 CCSR,澳大利亚的 CSIRO 和英国 Hadley 中心的 HadCM3 形成情景,用于产生未来的地区气象变化包括气温和降雨等,然后将数据输入到 SWAT 中,模拟相应的未来河水流量。结果表明,年均河水流量会产生减少的趋势,造成供水紧缺。Marshall 等^[35]采用 SWAT 模型来评估新英格兰 Connecticut 河流域温度升高对水量和水质的潜在影响。预测结果显示,气候变化对流域的径流,泥沙负荷和营养物(氮和磷)负荷有重大影响。Nunes 等^[36]研究了气温(升高 6.4 °C)、降雨(降低 40%)和 CO₂ 浓度(增加 100%)变化对水源、作物产量、土壤侵蚀的影响。结果表明,地表径流对气候变化趋势最敏感(降低 80%),其次是微生物的生长(降低 40%),土壤侵蚀在降雨量变化不大时,有显著的增长趋势(达到 150%)。

张明旭等^[37]应用 SWAT 模型,对西溪流域不同气温和降雨组合下的情景进行模拟,结果表明降雨量的变化是影响西溪径流量变化的主要因素。于磊等^[38]将 SWAT 模型应用于中尺度流域—漳卫南流域,设置了 24 种不同气候情景,定量分析了气候变化对流域水循环的影响。模拟结果表明,气候变化对于流域蒸发量(ET)、地表径流量和产水量均有显著影响:流域降水量增加,流域蒸发量(ET)、径流量和产水量都随之相应增加;

流域气温增加,蒸发量(ET)随之相应增加,但径流量和产水量随气温增加而相应降低。车赛等^[39]利用 SWAT 模型以黄河源区为研究对象,建立了不同气候波动和土地覆盖变化情景,模拟和预测未来水资源的变化,并着重冰雪和冻土的水文过程调试。模拟结果显示 SWAT 模型能够较好地模拟黄河源区的水资源变化。

3.5 模型输入参数敏感性分析,校准

Setegn 等^[40]应用 SWAT2005 模型模拟塔纳湖流域的水量平衡,研究了 SWAT 模型预测塔纳湖流域径流的性能和可行性。使用 SUFI-2, GLUE 和 ParaSol 算法对模型校准和验证。得到了很好的模拟结果。Green 等^[41]将一个自动校准—敏感性分析程序嵌入到 SWAT2005 中优化参数处理,评估了自动校准—敏感性分析程序在小尺度小流域的有效性,比较和评价了不同的优化算法校准模型的差别。在这项研究中,五个优化算法(genetic algorithms、shuffled complex evolution、particle swarm optimization、differential evolution、artificial immune system)测试了 SWAT 模型在 4 个流域的自动参数校准。结果表明,遗传算法(GA)优于其他四个算法,PSO 可以取得比其他算法更好的参数解决方案。Chaplot^[42]在不同 DEM 分辨率(20~500 m)、土壤类型图比例尺(1:250 00~1:250 000)模拟了农田流域出口处的径流、泥沙和 NO₃-N 负荷。结果显示,DEM 分辨率最大为 50 m 时,能得到较好的结果,减小分辨率对径流的计算影响不大,但对氮和泥沙产量的预测会产生错误,土壤类型图比例尺为 1:250 00 时,模拟得更准确。

国内,胡连伍^[43]等模拟了丰乐河 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。王艳君等^[44]将 SWAT 模型应用于秦淮河流域,模拟和分析了子流域划分和 DEM 分辨率对流域径流模拟结果的影响。研究表明:产流量随着子流域划分数目的增加几乎没有变化,最大相对偏差不超过 5%;DEM 分辨率的变化对径流的模拟影响也不大,尤其在 DEM 格网单元低于 100 m 时,各种 DEM 格网单元模拟结果的相对偏差最大约为 1%。

4 展望

SWAT 模型在世界范围内的广泛应用表明了它是一个通用模型,可用于模拟多种环境过程,为流域管理提供了决策支撑。但由于用户的需求和科学的发展,模型需要进一步改进与完善,提

高其模拟精度,增加新的功能,扩大模拟的范围。建议改进模型时考虑以下几个方面。

(1) 更真实的模拟景观运输过程,HRUs 的非空间性使模型变得简单,这是 SWAT 的一个关键弱点,同时允许每个子流域中土壤和土地利用的异质性,不能精确反映污染物质在各种景观中的迁移过程,如点源污染地区与河流之间区域的潜在污染以及各种农业管理措施在空间尺度上的影响,影响了模型模拟精度。如何将 HRUs 之间的水流、泥沙运移和营养物质迁移考虑进来就成为模型改进的方向之一。

(2) SWAT 的一个局限就是不能很好地模拟地下水流与溶质运移,处理地下水的方式是一维的,概念性的,对浅层地下水和地下水的模拟缺乏动态性,因此如何将 SWAT 模型与地下水模型(如 MODFLOW)耦合或修改其地下水模块成为重要的研究方向之一。

(3) 河流演算需要进一步测试与完善,包括 QUAL2E 演算。改进河道恶化和泥沙沉积演算,能更好的描述泥沙运输并解释营养物负荷与泥沙运动的联系。目前 SWAT 假设土壤有机碳含量是不变的,应更新碳循环子模块,以更切合实际地描述碳循环过程。

(4) 作物生长组件是 EPIC 作物模型的简化,用一个单一的植物生长模型模拟所有类型的植被,对植物生长过程的模拟十分简化,应扩大植物参数数据库,可以模拟更大范围的植被情景,扩展作物生长组件,包括修正作物参数。

参考文献:

- [1] EPA. National Water Quality Inventory-2000 Report to Congress[M]. Washington D C: Environmental Protection Agency, 2002.
- [2] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications and future research directions[J]. Trans Am Soc Agric Biol Engrs, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [3] WILLIAMS J R, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. History of model development at Temple[J]. Texas Hydrol Sci J, 2008, 53(5): 948-960.
- [4] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型-理论方法与应用[M].中国环境科学出版社,2006.
HAO Fanghua, CHENG Hongguang, YANG Shengtian. Non-point Source Pollution Model[M]. China Environmental Science Press, 2006.
- [5] DU B, JI X, HARMEL R D, et al. Evaluation of a watershed model for estimating daily flow using limited flow measurements[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(2): 475-484.
- [6] GESSESE A, YONAS M. Prediction of sediment inflow to legedadi reservoir using SWAT watershed and CCHEID sediment

- transport models[J]. Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine, 2008, 1: 65-74.
- [7] SCHNEIDER K, KETZER B, BREUER L. Evaluation of evapotranspiration methods for model validation in a semi-arid watershed in northern China[J]. Advances in Geosciences, 2008, 11: 37-42.
- [8] AHL R S, WOODS S W, ZUURING H R. Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, U.S.A.[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(6): 1411-1430.
- [9] BÄRLUND I, KIRKKALA T. Examining a model and assessing its performance in describing nutrient and sediment transport dynamics in a catchment in southwestern Finland[J]. Boreal Environment Research, 2008, 13(3): 195-207.
- [10] CHAPONNIERE G, BOULET A, CHEHBOUNI A. Understanding hydrological processes with scarce data in a mountain environment[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1908-1921.
- [11] IMMERZEEL W W, GAUR A, ZWART S J. Integrating remote sensing and process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 11-24.
- [12] ROSTAMIAN R, JALEH A, AFYUNI M, et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous watersheds in central Iran[J]. Hydrol Sci J, 2008, 53(5): 977-988.
- [13] 张利平, 陈小凤, 张晓琳. SWAT 模型在白莲河流域径流模拟中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(6): 4-8.
- ZHANG Liping, CHEN Xiaofeng, ZHANG Xiaolin. Application of SWAT model in Bailian River Valley runoff simulation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(6): 4-8.
- [14] 陈小凤. 基于 SWAT 模型的白莲河流域径流模拟研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 21-24.
- CHEN Xiaofeng. Simulation study on runoff in Bailian River Basin based on SWAT model[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2009, 27(1): 21-24.
- [15] 李晓, 李致家, 董佳瑞. SWAT 模型在伊河上游径流模拟中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 23-26.
- LI Xiao, LI Zhijia, DONG Jiarui. Application of SWAT model in runoff simulation in upper reaches of Yihe River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(1): 23-26.
- [16] 王中根, 朱新军, 夏军, 等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 1-6.
- WANG Zhonggen, ZHU Xinjun, XIA Jun, et al. Study on distributed hydrological model in Hai River Basin[J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 1-6.
- [17] 罗慈兰, 叶水根, 李黔湘. SWAT 模型在房山区 ET 的模拟研究[J]. 节水灌溉, 2008, 10: 47-49.
- LUO Cilan, YE Shuigen, LI Qianxiang. Application of SWAT model in ET simulation of Fangshan District of Beijing[J]. Water Saving Irrigation, 2008, 10: 47-49.
- [18] LUO Y, ZHANG M. Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT[J]. Environmental Pollution, 2009: 1-9.
- [19] BULUT E, AKSOY A. Impact of fertilizer usage on phosphorus loads to Lake Uluabat[J]. Desalination, 2008, 226: 289-297.
- [20] GEVAERT V, VAN G A, HOLVOET K. SWAT developments and recommendations for modeling agricultural pesticide mitigation measures in river basins[J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(5): 1075-1089.
- [21] BOURAOUI F, GRIZZETTI B. An integrated modeling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France)[J]. Ecological Modeling, 2008, 212(3-4): 450-459.
- [22] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 133-37.
- FAN Lili, SHEN Zhenyao, LIU Ruimin, et al. Spatial distribution of non-point source pollution in Daninghe watershed based on SWAT model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(4): 133-37.
- [23] 李家科, 刘健, 秦耀民, 等. 基于 SWAT 模型的渭河流域非点源氮污染分布式模拟[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 278-285.
- LI Jiake, LIU Jian, QIN Yaomin, et al. Distributed simulation on nitrogen non-point source pollution in the Weihe River Watershed based on SWAT model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 278-285.
- [24] 王晓燕, 秦福来, 欧洋, 等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟-以密云水库北部流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1098-1105.
- WANG Xiaoyan, QIN Fulai, OU Yang, et al. SWAT-Based Simulation on Non-point Source Pollution in the Northern Watershed of Miyun Reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1098-1105.
- [25] TONG S T Y, LIU A J, GOODRICH J A. Assessing the water quality impacts of future land-use changes in an urbanising watershed[C]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2009, 26(1): 3-18.
- [26] BHATTARAI G, SRIVASTAVA P, MARZEN L. Assessment of Economic and water quality impacts of land use change using a simple bioeconomic model[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 42(1): 122-131.
- [27] SCHILLING K E, JHA M K, ZHANG Y K. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions[J]. Water Resources Research, 2008, 44: 1-12.
- [28] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 440-448.
- QIN Yaomin, XU Yanling, LI Huaen. SWAT model of non-point source pollution under different land use scenarios in the Heihe river basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 440-448.
- [29] 李宏亮. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化对水文要素的影响研究[D]. 河北师范大学, 2007.
- LI Hongliang. Study on the impacts of land use/land cover change to the hydrological base on the SWAT model[J]. Hebei Normal University, 2007.
- [30] 于磊, 朱新军. 基于 SWAT 的中尺度流域土地利用变化对水文响应模拟研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 53-56.
- YU Lei, ZHU Xinjun. Simulation of hydrological response to land use changes in medium scale basin based on SWAT[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4): 53-56.
- [31] DHAR S, MAZUMDAR A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case study in India[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(16): 2394-2406.
- [32] FICKLIN D L, LUO Y, ZHANG M. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2009: 1-43.
- [33] SOMURA H, ARNOLD J, HOFFMAN D, et al. Impact of climate

- change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve[J]. *Hydrological Processes*, 2009: 1-14
- [34] XU Z X, ZHAO F F, LI J Y. Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River Basin[J]. *Quaternary International*, 2008: 1-32.
- [35] MARSHALL E, RANDHIR T. Effect of climate change on watershed system: a regional analysis[J]. *Climatic Change*, 2008, 89: 263-280.
- [36] NUNES J P, SEIXAS J, PACHECO N R. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 22(16): 3115-3134.
- [37] 张明旭, 赵海英. 晋江西流域气候变化的 SWAT 模型模拟[J]. 2009, 30(4): 92-94.
ZHANG Mingxu, ZHAO Haiying. Climate change of the Xixi Watershed of Jin River Based on SWAT model[J]. *Journal of Tonghua Normal University*, 2009, 30(4): 92-94.
- [38] 于磊, 顾鉴, 李建新, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 152-155.
YU Lei, GU liu, LI Jianxin, et al. A study of hydrologic responses to climate change in medium scale basin based on SWAT[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 152-155.
- [39] 车骞, 王根绪, 孙福广, 等. 气候波动和土地覆盖变化下的黄河源区水资源预测[J]. *水文*, 2007, 27(2): 11-15.
CHE Qian, WANG Genxu, KONG Fuguang, et al. Runoff estimation under climate and land cover change in Yellow River source region[J]. *Hydrology*, 2007, 27(2): 11-15.
- [40] SETEGN S G, SRINIVASAN R, DARGAHI B. Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, ethiopia using SWAT model[J]. *The Open Hydrology Journal*, 2009, 2: 49-62.
- [41] GREEN C H, VAN G A. Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT 2005 in small-scale watersheds[J]. *Environmental Modeling and Software*, 2008, 23(4): 422-434.
- [42] CHAPLOT V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO₃-N loads predictions[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 207-222.
- [43] 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.
HU Lianwu, WANG Xuejun, LUO Dinggui, et al. Effect of sub-watershed partitioning on flow, sediment and nutrient predictions[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 235-240.
- [44] 王艳君, 吕宏军, 姜彤. 子流域划分和 DEM 分辨率对 SWAT 径流模拟的影响研究[J]. *水文*, 2008, 28(3): 22-26.
WANG Yanjun, LV Hongjun, JIANG Tong. Influence of watershed subdivision and DEM resolution on SWAT runoff simulation[J]. *Hydrology*, 2008, 28(3): 22-26.

Advances in non-point source pollution modelling with SWAT

ZHANG Lei, LU Wenxi*, AN Yonglei, YI Yanping, LI Di

College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: The model simulation is an effective tool for quantitative estimate of non-point source pollution and is the premise to program, control and manage NPS. SWAT model has been rapid developed and applied domestic and overseas in recent years. It is an effective tool for the evaluation of non-point source pollution problems in wide range and environmental variation condition. This paper provides an brief overview of SWAT development history and principles and summarize current research progress on hydrologic analyses, pollution loss simulation, input parameter, land use and climate change impacts on hydrology. Recommended research needed for SWAT is also presented so as to provide reference for further improvement of the model. The results show that, SWAT can obtain good simulated and predicted results in modeling hydrological assessment (runoff, sediment). It can simulate the migration process of pollutants (pesticides and fertilizers) in the farmland and river network, simulate and analyze the land use / cover change and climate change impact on hydrological processes. The determination of model parameters and simulation on groundwater flow and solute transport are major issues which require further research and improvement.

Key words: SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model; Non-point Source (NPS) Pollution; application progress