

SWAT 模型及其在水环境非点源污染中的应用研究进展^{*}

杨菁荟¹, 张万昌²

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 南京大学 水科学研究中心, 南京 210093)

摘 要:非点源污染是水环境污染的主要来源之一,其过程机理复杂,应用水环境污染模型模拟是研究非点源污染的重要手段。SWAT 模型是国际上著名的分布式流域水环境模型之一,结合了遥感(RS)、地理信息系统(GIS)技术,能够准确、长时间段连续地模拟复杂流域的各种水环境过程以及气候变化、土地利用类型、管理措施对流域水平衡和非点源污染的影响,为监测、评价、研究流域水环境非点源污染状况提供了强大的支持平台。在大量调研国内外相关文献的基础上,围绕模型的主要标志性改进及应用成果介绍了 SWAT 模型的发展历程和现状,论述了模型应用于水环境非点源污染研究的几个主要方面和国内外研究新进展,分析了目前国内应用 SWAT 模型进行水环境非点源污染研究存在的问题,并对 SWAT 非点源污染子模型的发展趋势做了展望,以推广这一先进模型在国内的应用范围,提高非点源污染模拟、监测、评价工作的效率及结果的可靠性。

关键词:SWAT; 非点源污染; 分布式模型; 水环境

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)05-0260-07

Research Progress on SWAT Model and Its Application on Water Environmental Nonpoint Source Pollution

YANG Jing-hui¹, ZHANG Wan-chang²

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Center for Hydrosociences Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract:As one major causes of water environmental contamination, Non-point Source Pollution (NPS) owing to its complex dynamic mechanism has drawn much attention from researchers to adopt water environmental pollution models as major means for simulation studies. Soil and Water Assessment Tool (SWAT), developed by U. S. Department of Agriculture (USDA), has gained international acceptance as an advanced, interdisciplinary, distributed water environmental model and a strong platform for simulation, investigation and assessment of watershed NPS. Being integrated with techniques of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS), SWAT is distinguished for its capabilities of comprehensively, continuously, reasonably simulating various long-term water environmental processes in complex meso- or macro-scale watersheds, as well as predicting the impacts of climate change, management practices, Land use and cover change (LUCC) on catchments' water balance and NPS. On the basis of extensive investigation of SWAT related literatures published at home and abroad, with great efforts concentrated on tracking the periodical remarkable improvements of SWAT, this paper systematically summarized the progress of model developing status and its current advancements. Discussions on successful applications of the model in various watersheds on NPS studies and state-of-the-art research progress were given together with the analysis of main problems and difficulties existed in application practices of SWAT on research of NPS in China. Additionally, future development and possible improvements for the NPS sub-model of SWAT were prospected. The paper was aimed at intensifying appropriate applications of SWAT on NPS studies in China to improve re-

^{*} 收稿日期:2009-05-08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07010-010);中科院“百人计划”择优支持项目(8-057493);国家重点基础研究发展规划 973 项目(2006CB400502,2001CB309404)

作者简介:杨菁荟(1985-),女,甘肃省兰州市人,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统在水文学中的应用研究。E-mail: yangjh.nju@gmail.com

通信作者:张万昌(1966-),男,河南省永城县人,教授,博士生导师,主要从事遥感与地理信息系统及其在全球变化及水文水资源中的应用研究。E-mail: zhangWC@nju.edu.cn

liability of model simulating results and efficiency of NPS research practices so as to provide quantitative, scientific decision supports for Best Management Practices (BMPs).

Key words: SWAT; non-point source pollution; distributed model; water environment

当前全球范围内的水资源问题日益突出,不仅表现在水量的不足,更反映在水质的恶化。水环境污染是导致水质恶化的最直接原因,它是点源和非点源污染共同作用的结果。点源污染是指排污口集中排放的工业和城市生活污水对水环境造成的污染;非点源污染是指溶解性或固体污染物(如泥沙、细菌、营养盐、重金属等)从非特定的点在大面积降水和径流冲刷作用下汇入受纳水体而引起的水体污染^[1]。随着点污染源的有效控制,非点源污染已成为水环境的主要污染源^[2]。特别是非点源污染物氮、磷引起的水体富营养化现象严重,成为我国大型湖泊水质恶化的主要原因^[3-4]。因此,对非点源污染的研究和控制成为水环境污染研究领域亟待解决的重要课题。

与点源污染相比,非点源污染的时空范围广,不确定性大,过程机理复杂,污染物负荷空间差异显著,监测困难,并且具有滞后性与潜伏性^[5],使得研究、控制和治理难度加大。传统的非点源污染监测方法需要耗费大量的人力、物力、财力,且难以获得科学的流域范围污染评价结果;而利用水环境污染模型进行非点源污染的定量模拟则具有费用低、评价周期短、简便易行等优点,并且可以从过程机理上模拟各类非点源污染物的迁移、转化、输移过程,有效解决污染的随机性和观测点的不确定性,得到科学、定量的污染评价及预测结果,为污染的控制和治理提供科学决策依据,成为非点源污染研究的重要技术手段。

20 世纪 70 年代以来,国际上已研究开发出了多个非点源污染模型,目前已经发展到相当高的水平^[6]。美国农业部(USDA)开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型^[7]即为其中一个著名的分布式流域水环境模型,主要通过对流域范围水文过程和非点源污染的模拟计算,预测和评价管理措施对水资源和水环境的影响。模型通过不断改进,发展已比较成熟,在世界范围内尤其是北美和欧洲许多流域的水环境污染模拟和水质评价方面得到了广泛的应用和验证,为流域水环境非点源污染的模拟、评价、预测和治理决策提供可靠的支持平台。

在我国,虽然从 20 世纪 80 年代已开始了对非点源污染的研究,但是到目前为止仅限于一些比较简单模型的应用,对于复杂非点源污染模型的应用

和研究在国内才刚刚起步^[6]。SWAT 模型作为大型、复杂的水环境模型在国内已有近十年的应用,但大多数研究都是应用 SWAT 的水文组件模拟预测流域的降雨、径流等水文过程或评价水资源状况;而应用 SWAT 的水环境污染组件进行流域非点源污染的模拟预测研究则还处于起步阶段,流域应用实例较少,经验仍显不足。目前国内关于 SWAT 模型在水环境非点源污染应用进展方面的文献综述较少,本文将在介绍 SWAT 模型发展现状的基础上讨论国内外应用 SWAT 模型研究水环境非点源污染的新进展以及模型应用中存在的一些问题,旨在为相关研究人员提供参考和借鉴。

1 SWAT 模型概述

SWAT 模型由美国农业部(USDA)开发,是基于过程的连续性分布式流域水环境模型,具有很强的水文物理机制,可以模拟较大范围复杂流域内的水文过程和多种非点源污染负荷如泥沙、营养物质、杀虫剂等随时间、空间的迁移变化情况,以及预测气候、土地利用、管理措施等的变化对流域产水、产沙、水环境污染等过程的长期影响^[8]。模型结合了遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等新技术,是集数据库管理、空间数据处理、数学计算、结果可视化表达等功能于一身的大型分布式流域水环境模型。SWAT 模型在国际上得到了广泛的验证、应用和不断改进,发展日趋成熟,是目前最能体现流域水循环过程和污染物输移机理理论研究最新进展的水环境模型^[9]。在水环境污染研究领域,SWAT 被广泛应用于模拟流域内主要非点源污染物的产生、迁移、转化过程,定量评价流域非点源污染状况,以及分析和预测污染控制管理措施对水污染的影响。

随着 GIS 技术的发展,SWAT 模型与几个著名的 GIS 软件结合,将 GIS 强大的空间数据管理分析功能应用于水环境模拟,大大提高了模型数据管理、数据预处理、参数提取、结果分析表达等工作的效率。SWAT 的 GIS 操作界面包括 GRASS(Geographical Resources Analysis Support System)界面,与 ArcView 结合的 AVSWAT 界面以及与 ArcGIS 结合的 ArcSWAT 界面。其中 AVSWAT 是目前应用最广泛的界面,而 ArcSWAT 是最新的操作界面。

SWAT 模型采用模块化结构,由三大部分组

成:子流域水文循环过程、河道径流演算、水库水量平衡与演算。其中子流域水文循环部分包括 8 个功能相对独立的模块:水文过程、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^[8]。在进行水环境非点源污染模拟时,主要应用的模块有:水文过程、泥沙、营养物、杀虫剂模块。其中水文模块是 SWAT 模型的核心组件之一,也是进行非点源污染模拟的基础和关键。

SWAT 模型采用分布式参数模拟方法,比传统的集总式参数模拟方法更符合流域下垫面非均质的实际情况,具有更高的模拟精度。SWAT 在模拟非

点源污染过程时,先将流域离散化为水文响应单元 (HRU) 来解决空间异质性问题,实现参数的分布式模拟;污染物的流失和迁移先在单个的 HRU 中进行模拟计算,然后在子流域中汇总,再模拟污染物总量在河道、水库等水体中的分配和迁移。

2 模型发展现状

2.1 模型发展历程

SWAT 模型历经近 30 a 开发改进,已发展成为大型复杂的分布式流域水环境模型,其发展历程如图 1 所示,同时也反映了模型的模块化结构。

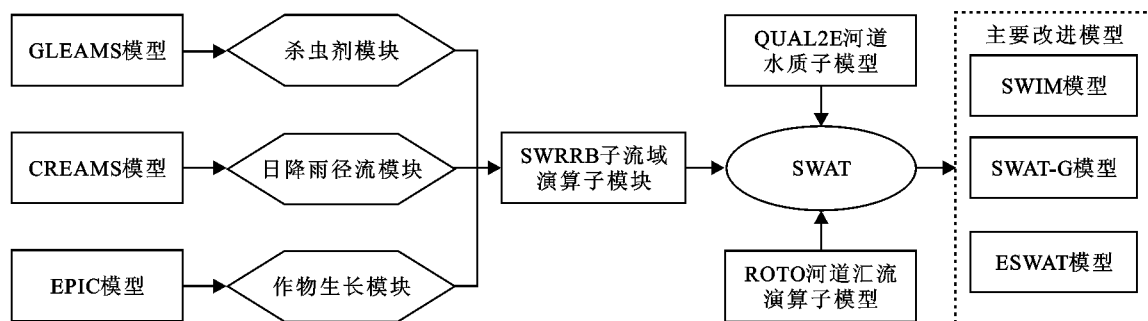


图 1 SWAT 模型发展历程示意图

美国农业部于 1973 年开发出了基于过程的田间尺度非点源污染模型,用于模拟土地管理措施对田间水沙和营养物质输移的影响;1980 年对其完善后开发出 CREAMS 模型,使之能模拟多种土壤、地面覆盖、管理措施的复杂流域。随后研究人员开发了模拟侵蚀对作物产量影响的 EPIC 模型、模拟地下水携带杀虫剂和营养物质的 GLEAMS 模型,以及基于 DEM 的单次暴雨径流非点源污染模型 AGNPS^[10]。1985 年修改 CREAMS 模型的日降雨水文模块,合并 CREAMS 模型的杀虫剂模块和 EPIC 模型的作物生长模块,增加天气发生器,开发出以日为时间步长的 SWRRB 模型,对流域径流的考虑更加详细。80 年代末,估计洪峰流速的 SCS 曲线、土壤侵蚀公式与河道水质模型 QUAL2E 以及用于模拟河道汇流的 ROTO 模型加入 SWRRB 最终发展成为 SWAT 模型。

SWAT 自发布至今,经历了多次重要的改进,已发布的版本主要有:SWAT 94.2、SWAT 96.2、SWAT 98.1、SWAT 99.2、SWAT 2000 和 SWAT 2005 等几个版本。每一次版本的升级都是基于模型的应用效果和用户反馈对模型组件的重要改进和功能的扩展完善,同时也体现了国际上应用 SWAT 进行水环境模拟的进展以及水文模型研究领域的重要成果。SWAT94 版引入了多个水文响应单元 (HRUs);96 版加入了营养物质、杀虫剂、自动施肥

与灌溉、彭曼公式等模块;98 版修正了融雪模块、水质模拟模块,扩展了营养物质迁移模块,增加了放牧、施肥等模块,并扩大了模型在南半球的适应性;99 版改进了水量平衡、营养物质循环机制并增加了城市径流的模拟;2000 版改善了“天气发生器”和模型在热带流域的适用性,增加了 Green & Ampt 渗流方程、马斯京根 (Muskingum) 算法和病菌传输模块,集成了所有的潜在蒸散发算法^[11];目前最新的 2005 版改进了病菌传输模块、杀虫剂模块、土壤含水量和植物蒸散发的计算方法,增加了天气预报功能子模块,并根据 van Griensven 和 Meixner 的研究提出的方法^[12]开发出了新的灵敏度分析和参数自动调整及不确定性分析子模块^[8]。

2.2 模型改进

SWAT 模型一直处于不断的改进与完善中,使其发展逐渐成熟,其中比较著名的改进模型有:Krysanova 等^[13]基于 SWAT93 针对评价气候和土地利用变化对水环境的影响开发而成的中尺度流域模型 SWIM;Eckhardt 等^[14]基于 SWAT99.2 针对低山地区流域的径流模拟开发而成的 SWAT-G,改进了 SWAT 入渗和壤中流的计算方法;ESWAT 是 van Griensven 等^[15]在 SWAT 以日为时间步长的基础上改进为以小时为时间步长,并对水质模拟、径流模拟和河道汇流模块进行了改进,实现了用户自定义“亚小时”时间范围的降雨输入和入渗、径流、

侵蚀及水质模拟,以及多站点、多变量的自动参数调整;Sophocleous等^[16]将SWAT与MODFLOW模型改进并结合以更好模拟地下水而开发的SWAT-MOD模型等。

国内对SWAT模型改进研究的主要成果有:黄清华等^[17]结合GIS和RS技术对SWAT模型进行了改进,应用于黑河干流山区流域对出山径流进行了模拟验证;张东等^[18]针对模型应用中存在的问题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,使模型的模拟精度得到较大提高;李丹等^[19]将改进的河道水质模型QUAL2K引入SWAT取代QUAL2E模型,发现对提高SWAT模型的水环境非点源污染模拟精度有一定效果。

上述对SWAT模型的不断改进,使SWAT的功能不断扩展,流域适用性逐渐广泛,应用程度越来越深入,模拟精度普遍提高,易用性改善,得到了世界范围内广大水文工作者的关注和广泛应用。

3 SWAT模型在非点源污染中的应用研究进展

由于模型发展和应用的不断成熟,SWAT被越来越多地用于流域水环境非点源污染模拟,以及分析和评价污染控制管理措施对水环境的影响。总的来说,SWAT对水环境污染的模拟效果比不上SWAT对水文过程的模拟效果,但是模拟精度仍然能普遍达到有效模拟不同尺度流域的水环境污染过程和状况,并为最优方案决策提供定量分析和判断依据的目的。基于国内外应用SWAT进行流域水环境非点源污染研究的主要成果,分以下几个方面讨论目前的研究进展。

3.1 营养物模拟

营养物负荷和输移是水环境污染模拟的重要内容,主要研究的营养物为氮、磷元素。在SWAT中,氮、磷的转化和迁移通过模拟流域内由多个无机物和有机库组成的营养物循环来实现。SWAT2005提供自动模拟化肥施放的处理程序,可以通过模拟农业无机肥的施放量来进行氮、磷负荷的模拟。Saleh, Stewart, Di Luzio等^[20-22]都发表了评价SWAT模拟美国德克萨斯州Bosque River流域氮、磷流失量效果的文章,这些文章中大部分模拟氮流失的月模拟模型校正后的平均NSE值都在0.60以上;模拟磷流失的模型校正后NSE值在0.39到0.93之间。通过与实测氮、磷流失量的比较,他们一

致得出结论:SWAT能够有效模拟流域营养物负荷与流失量。Bosch^[23]在应用SWAT模拟多湖流域营养物输出量的基础上研究了水库和湖泊对河流中营养物输出量的影响,指出水库大小和位置的变化对流域营养物输出量的影响非常显著。欧洲、非洲一些国家以及印度等国也广泛应用SWAT模拟各种不同类型流域的非点源污染情况,均得到了较理想的模拟结果。

国内在这方面的研究也已经开展,郝芳华等^[24]结合GIS软件和SWAT模型分县区、分子流域模拟了官厅水库流域的氮、磷负荷;张思聪等^[25]应用SWAT模型模拟了淮河上游的竹竿河流域长时间序列非点源污染负荷的产输出过程,并根据模拟结果分析了其非点源污染负荷的时空分布特点;程红光等^[26]成功将SWAT应用于我国的黑河流域模拟 $\text{NH}_3\text{-N}$ 流失量,并对不同降水条件下不同土地利用类型的各子流域氮元素的入河系数进行了研究;张楠等^[27]应用SWAT模拟了天津市的城市径流及非点源污染负荷,并分析了不同水平年、地貌条件下污染物产出量不同的原因;王晓燕等^[28]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,并对研究区非点源污染负荷的时空变化及不同土地利用类型对非点源污染负荷的影响进行了分析评价。

然而,国内外许多研究成果都表现出应用中普遍存在的问题:由于SWAT算法的局限性,使得对营养物流失量的模拟值往往低于营养物流失量较高月份的实际观测值,而高于营养物流失量较低月份的实际观测值,并且逐日的模拟结果一般劣于逐月的模拟结果。

3.2 杀虫剂模拟

杀虫剂作为水体非点源污染的主要污染物之一,其过度使用对流域水质的污染状况以及杀虫剂本身的转化、迁移、去向,成为近年来水环境模拟的一个重要研究方向。SWAT的杀虫剂模块对于杀虫剂输移的模拟包括挥发、过滤、侵蚀沉积、径流溶解和基流运输等过程。Vazquez-Amabile等^[29]通过在美国加州Walnut Creek流域的实验指出,模拟时间对于校正和验证SWAT模拟杀虫剂的施放是一个极为灵敏的参数,流域出口的杀虫剂负荷模拟结果与观测数据相一致,而曲线图分析和统计分析显示了模型在模拟杀虫剂的迁移趋势上具有很好的效果。Gevaert等^[30]通过对SWAT模型的改进和参数率定模拟了比利时中部一个小流域河流中的杀虫剂负荷,并对多种减少杀虫剂污染的措施进行了模拟和评估,得出等高条播耕种方式比其他措施更能有效减少杀虫剂污染的结论;Zhang等^[31]用

SWAT 模拟了加州不同农药控制措施下的水体中杀虫剂浓度,并结合政府农药使用报告评价不同农药控制措施对水质的影响,为选择减少地表水农药污染的最佳决策方案提供了定量分析基础。目前,由于观测数据不全,资料难以获取等因素,国内应用 SWAT 模拟杀虫剂负荷及输移过程的研究还很少。

3.3 泥沙模拟

SWAT2005 中的流域产沙量根据改进的通用土壤流失方程 (MUSLE) 进行计算;泥沙输移过程通过 SWAT2005 中的最大流速法进行模拟,这种方法相比以前版本 SWAT 中的水流能量法有所简化。许多关于 SWAT 模拟与计算河流泥沙负荷的文章都显示了 SWAT 在预测不同尺度流域泥沙负荷方面的能力。Saleh^[32] 等应用 SWAT 对美国德州 Bosque River 上游流域的水环境进行了综合模拟,发现模型预测的月泥沙输出量与观测数据匹配较好,而日泥沙输出预测结果则与观测数据的匹配程度较差。Arnold 等^[33] 分别应用流量特征曲线方法和 SWAT 模型模拟方法对德州 5 个主要流域的年泥沙负荷做了估算和模拟,并将二者的结果进行比较,发现对于所有 5 个流域来说,SWAT 模拟的泥沙量和流量特征曲线法估算的泥沙量都能达到合理的一致性。SWAT 泥沙量模拟的研究在欧洲、亚洲、北非一些国家也得到了广泛应用,Behera 等^[34] 验证了 SWAT 模拟印度东部流域雨季泥沙量的适用性,得到了较为满意的结果。

在我国,应用 SWAT 进行流域土壤侵蚀和泥沙模拟评价的研究也有涉及,Hao 等^[35] 应用 SWAT 成功模拟了我国黄河流域洛河段一个具有高侵蚀模数的大尺度子流域的泥沙负荷,发现模型预测结果与实际观测数据可以精确匹配。庞靖鹏^[36] 等将 SWAT 应用于密云水库潮河子流域,通过模型率定与验证发现模型对该流域泥沙的模拟效果较好,并且根据模拟结果对流域的土壤侵蚀强度进行了分级,分析了不同土地利用方式对流域产沙的影响。

3.4 管理措施影响评价

SWAT 在美国被广泛用于美国农业部的水土保持效应评价项目,定量模拟和评价各种水土保持措施对国家或流域水环境带来的效益^[37],进一步分析比较水土保持管理措施对于不同地理条件、不同尺度下流域水环境的影响程度差异,以及多种管理措施同时实施的效益模拟和分析。如 Santhi 等^[38] 应用 SWAT 成功分析评价了不同的化肥施用管理措施、草料收割管理措施和其他一些水污染控制措施对美国德克萨斯州 West Fork 流域水环境的影响,并指出管理措施在小尺度流域范围的效果相比大尺度流域更为显著。

我国这方面的研究涉及较少,万超等^[39] 利用 SWAT 模型针对不同水平年研究了潘家口水库上游地区的非点源污染负荷及产出特征,并分析了施肥的时间和用量对流域非点源污染负荷的影响,指出合理的施肥控制措施可以有效减少非点源污染负荷;苏保林等^[40] 应用 SWAT 研究了密云水库流域的非点源污染时空变化特征,指出农牧业活动发达的区域是非点源污染物流失的关键区域,森林和草地区域流失量则较低,并针对不同的流域管理措施进行了情景分析,为最佳管理措施 (BMPs) 的选择提供了依据。

3.5 TMDL 水质分析

为控制水质污染,美国环境保护署 (USPDA) 通过修补清洁水法案 (Clean Water Act) 要求各州必须对境内主要被污染河流进行定量水质分析,制定 TMDL (Total Maximum Daily Loads) 规划,根据河流不同的净污能力确定主要监测河流的最大允许污染物排放量 (包括点源污染和非点源污染),并据此制定相应的污染控制措施。该项目也被其他一些国家效仿以有效控制河流水质。SWAT 模型因其适用性强、模拟效率高、结果合理可靠等特点,成为应用于该项目的最为普遍的水质分析模型,用来识别河流关键污染源区和进行最佳管理措施的辅助决策。

国际上应用 SWAT 模型进行 TMDL 水质分析的代表性成果有:Benham 等^[41] 应用 SWAT 模型对美国密苏里州南部 Shoal Creek 流域的 TMDL 进行了模拟与评价,用频率曲线与水体细菌浓度的观测和模拟值相比对的方法率定模型,模拟了不同污染源对流域水系的污染程度,并且评价了几个管理措施的效果和影响。Kang 等^[42] 将 SWAT 模型应用于韩国一个农业小流域,通过水质水量的耦合模拟与分析制定了 TMDL 规划,并且定量评价了 TMDL 的分布对各子流域污染物控制的影响等。在我国由于缺少相应的政策法规,相关的研究还没有涉及。

4 结论与展望

非点源污染是目前水环境污染的主要污染形式,其研究、监测、模拟和控制治理成为当前水文与环境领域重要的研究课题之一。由于水环境污染的复杂性,传统研究方法效率低且投入高,应用流域水环境模型进行污染的模拟、预测与管理措施评价则成为一种重要的研究手段。SWAT 模型是先进的具有很强水文物理机制的大型分布式流域水环境模型,能够合理、有效地模拟流域范围内非点源污染物的产生及输移过程,定量计算污染负荷和输出量等参数,为水环境非点源污染的监测、控制和治理提供科学依据,具有重要的实际意义。

然而,由于目前科学研究对于非点源污染物的迁移转化机制还不完全清楚,SWAT水环境污染子模型的机理算法势必存在不足,需要根据模型应用和相关学科的理论发展不断进行改进和功能扩展。比如:人畜粪便中的病菌是威胁人类健康的首要水环境污染,但由于SWAT模型中病菌迁移模拟算法尚不严密,使得这方面的研究工作受到制约,因此,病菌模块需要进一步完善以适应模型应用的需要;重金属和废弃医药用品产生的有害有机物也是重要的水环境非点源污染物,而对这两种污染物迁移转化规律认识的不足使得SWAT模型的现有模块和算法还不足以有效模拟这两种污染物的迁移转化与沉积,这方面模块的开发和功能的扩展还有待解决;结合QUAL2E河道水动力模型模拟非点源污染物在河道内运移过程的模型机理还不够完善,需要结合QUAL2E的改进模型,并且加入营养物和杀虫剂在河道内的物理化学转化机制,以进一步提高SWAT模型的非点源污染模拟精度。

国际上欧美一些国家应用SWAT模型进行水环境污染的模拟、监测和治理措施评价已成为较为普遍的手段,为许多水环境问题的研究和解决提供了科学、高效、低投入的方法。在国内,SWAT模型在水文过程模拟的应用较广泛,但在水环境污染研究方面的应用尚处于起步阶段,与美国仍有较大差距。其原因主要有以下几方面:(1)SWAT模型构建需要大量的数据支持,包括专题地图、水文气象监测数据以及泥沙、污染物等水质监测数据,由于制度不完善,大多数监测数据在我国较难取得,共享程度低且数据不完备,尤其是非点源污染监测数据的获得更为困难,限制了非点源污染模拟研究的开展;(2)SWAT模型自带的土壤数据库、植被参数库是根据美国的自然地理情况设计的,和中国的实际情况有较大出入,大量模型驱动数据需要重新获取与制备,且模型数据库使用的数据标准和中国现有的数据标准不一致,增加了数据库建设与使用的难度,导致模型使用效率低下^[18];(3)SWAT模型描述某些物理过程的经验公式可能不适用于我国的某些流域,导致模拟精度不高,限制了模型在我国的推广;(4)我国水文学和环境学对于非点源污染物迁移转化物理化学机制的基础理论研究成果较少,限制了SWAT模型的改进与应用范围的扩展。因此,为了推广SWAT这一先进水环境模型在我国非点源污染研究中的应用,还需要国内广大科学工作者的共同努力,以提高模拟、评价非点源污染状况的工作效率,为政府最优管理措施的选择提供科学决策依据,有效控制我国水环境非点源污染的现状,从根本上解决水质问题。

参考文献:

- [1] Line D E, McLaughlin R A, Osmond D L, et al. Non-point sources[J]. Water Environment Research, 1998, 70(4): 895-911.
- [2] 雷秋良,张继宗,岳勇,等. GIS技术在非点源污染研究中的应用进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 687-693.
- [3] 胡雪涛,陈吉宁,张天柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
- [4] Wang X J, Zhang W, Huang Y N, et al. Modeling and simulation of point-nonpoint source effluent trading in Taihu Lake area: Perspective of nonpoint sources control in China[J]. Science of the Total Environment, 2004, 325(1/3): 39-50.
- [5] 阮晓红,宋世霞,张瑛. 非点源污染模型化方法的研究进展及其应用[J]. 人民黄河, 2002, 24(11): 25-29.
- [6] 金树权,吕军. 水环境非点源污染模型的研究进展和展望[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1022-1026.
- [7] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah T S, et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 43(1): 73-89.
- [8] Neitsch S L, Arnold J G, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005[EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/2005>.
- [9] Nejadhashemi A P, Mankin K R. Comparison of Four Water Quality Models (STEPL, PLOAD, L-THIA, and AVSWAT-X) in Simulating Sediment and Nutrient Dynamics in a Watershed[Z]. Minneapolis: ASABE Annual Meeting, 2007.
- [10] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AG-NPS, agricultural nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [11] Cassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, application, and future research directions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [12] van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1/4): 10-23.
- [13] Krysanova V, Hatterman F, Wechsung F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 763-783.
- [14] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT - G, a version of SWAT 99.2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 641-644.
- [15] van Griensven A, Bauwens W. Application and evalua-

- tion of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 827-838.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李丹, 薛联青, 郝振纯. 基于 SWAT 模型的流域面源污染模拟影响分析[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(3): 4-7.
- [20] Saleh A, Du B. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(4): 1039-1049.
- [21] Stewart G R, Munster C L, Vietor D M, et al. Simulating water quality improvements in the Upper North Bosque River Watershed due to phosphorus export through turfgrass sod[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(2): 357-366.
- [22] Di Luzio M, Srinivasan R, Arnold J G. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution[J]. *Transactions in GIS*, 2004, 8(1): 113-136.
- [23] Bosch N S. The influence of impoundments on riverine nutrient transport: An evaluation using the Soil and Water Assessment Tool[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/4): 131-147.
- [24] 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.
- [25] 张思聪, 刘铭环. 竹竿河流域面源污染模拟计算和分析[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(5): 51-57.
- [26] 程红光, 郝芳华, 任希岩, 等. 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 392-397.
- [27] 张楠, 张占庞, 周祖昊, 等. 基于 SWAT 的天津市非点源污染分布特性分析[J]. *人民黄河*, 2008, 30(4): 60-61.
- [28] 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.
- [29] Vazquez-Amable G G, Engel B A, Flanagan D C. Modeling and risk analysis of nonpoint source pollution caused by atrazine using SWAT[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(3): 667-678.
- [30] Gevaert V, van Griensven A, Holvoet K, Seuntjens, et al. SWAT developments and recommendations for modelling agricultural pesticide mitigation measures in river basins[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(5): 1075-1089.
- [31] Zhang X, Liu X, Luo Y, et al. Evaluation of water quality in an agricultural watershed as affected by almond pest management practices[J]. *Water Research*, 2008, 42(14): 3685-3696.
- [32] Saleh A, Arnold J G, Cassman P W, et al. Application of SWAT for the upper north Bosque Watershed[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(5): 1077-1087.
- [33] Arnold J G, Srinivasan R, Ramanarayanan T S, et al. Water resources of the Texas Gulf Basin[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(3): 121-133.
- [34] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process model[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113(1/4): 62-72.
- [35] 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.
- [36] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 89-95.
- [37] Mausbach M J, Dedrick A R. The length we go: Measuring environmental benefits of conservation practices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(5): 96-103.
- [38] 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 and Software*, 2006, 21(8): 1141-1157.
- [39] 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, 81(2): 62-68.
- [40] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源污染识别[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(3): 360-365.
- [41] Benham B L, Baffaut C, Zeckoski R W, et al. Modeling bacteria fate and transport in watershed models to support TMDLs[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(4): 987-1002.
- [42] 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*, 2006, 79(1): 72-92.