

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.001

SWAT 模型的开发与应用进展

赖格英^{1 2}, 吴敦银^{1 2}, 钟业喜^{1 2}, 曾峰海^{1 2}, 陈 洁^{1 2}, 张 琰^{1 2}

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022 ; 2. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要 : 为了跟踪 SWAT 模型近年来的发展与应用趋势, 从分析该模型的特征着手, 回顾该模型的开发与完善历史, 比较了该模型与国内外常用的 ANSWERS, CREAMS, GLEAMS, DWSM, MIKE SHE, AG-NPS, EPIC 等模型在性能上的主要差异, 对该模型近几年来在国内外不同领域及不同时空尺度的应用进行综述, 重点包括水质和水量模拟评估、非点源污染负荷估算及形成机制探讨、情景分析与预测、环境变化及农业管理措施对水文水质的影响、气候变化对区域水循环和作物生长的影响、模型数据预处理及率定方法、模型不确定性研究、该模型与其他模型的耦合, 以及该模型在不同地区适应性评估与应用、不同应用领域对该模型的修正或改正等内容。

关键词 : SWAT 模型 ; 分布式模型 ; 综述

中图分类号 : P33 文献标志码 : A 文章编号 : 1000-1980(2012)03-0243-09

Progress in development and applications of SWAT model

LAI Ge-ying^{1 2}, WU Dun-ying^{1 2}, ZHONG Ye-xi^{1 2}, ZENG Feng-hai^{1 2}, CHEN Jie^{1 2}, ZHANG Li^{1 2}

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China ;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Nanchang 330022, China)

Abstract : In order to track the trend of development and applications of the soil and water assessment tool (SWAT) model, based on analysis of the characteristics and the history of development and improvement of the model, a comparison was conducted in this study of the performance of the SWAT model and commonly used distributed models, including ANSWERS, CREAMS, GLEAMS, DWSM, MIKE SHE, AGNPS, and EPIC. A review of worldwide applications of the SWAT model in various research fields and at different temporal and spatial scales is provided. These applications mainly include assessment of water quality and quantity based on modeling ; evaluation, mechanism analysis, scenario simulation, and prediction of non-point source pollution ; analysis of the impacts of environmental changes and agricultural management on hydrology and water quality ; analysis of the impacts of climate changes on regional water cycle and crop growth ; pre-processing and calibration of the model data ; uncertainty study of the model ; coupling of the model with other models ; applicable assessment of the model in different regions ; and modification and correction of the model when it is applied to various fields.

Key words : SWAT model ; distributed model ; review

SWAT(soil and water assessment tool)模型是 20 世纪 90 年代美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度、时间连续、基于过程的半分布式机理模型。它可以在水文响应单元的空间尺度上模拟地表径流、入渗、侧流、地下水流、回流、融雪径流、土壤温度、土壤湿度、蒸散发、产沙输沙、作物生长、养分(氮、磷)流失、流域水质、农药/杀虫剂等多种过程以及各种农业管理措施(耕作、灌溉、施肥、收割、用水调度等)对这些过程的影响。由于该模型综合考虑了水文(包括地表水和地下水)、水质、土壤、气象、植被、植物生长、农业管理等多种过程, 使其具有以水为主导的生态水文模型或环境水文模型的特征, 而不再是传统意义上的水文模型^[1]。

收稿日期 : 2011-04-06
基金项目 : 国家自然科学基金(40971266)
作者简介 : 赖格英(1963 —) , 男, 江西寻乌人, 教授, 博士, 主要从事遥感、地理信息系统及流域地表过程模拟研究。E-mail : laigeying@126.com

该模型自开发以来,不断得到更新和完善,使其在适应性、自动划分子流域、模型的参数化敏感性、模型的校准与验证及其与其他模型的整合等方面得以完善。此外,该模型与 GRASS、ArcView、MapWindows 以及 ArcGIS 等多种 GIS 平台集成,使其具有非常友好的用户界面,为模型运行所涉及的诸如流域边界、地形、土壤类型及其理化属性的空间分布、土地利用/覆盖、流域的空间离散化等大量空间数据的前后处理提供了强大的支持。与同类型模型相比,该模型不仅源码开放易于获取,而且在性能方面也有许多独到之处,因而在模拟非点源污染、水文对环境变化的响应以及洪水短期预报等方面得到了国际上大量的应用,自 2001 年以来召开了多次与其相关的专题国际会议,模型表现出了强大的生命力和广阔的发展前景。

笔者从分析 SWAT 模型的特征着手,回顾该模型的开发与完善历史,比较该模型与国内外常用的 ANSWERS、CREAMS、GLEAMS、DWSM、MIKE SHE、AGNPS、EPIC 等模型的主要性能差异,对该模型近几年来在国内外不同领域及不同时空尺度的应用与改正进行综述。

1 SWAT 模型的特征及开发历史

1.1 SWAT 模型的基本特征

20 世纪 80 年代以来,由于遥感技术、地理信息系统和计算机技术的应用,大幅度提高了空间信息处理的工作效率和模型的精度,新的水文模型或生态水文模型不断出现。这些应用模型归纳起来大致有 3 种,即简单估算或经验模型、集总式参数模型、采用分布式参数模型。简单估算或经验模型方法不涉及生态水文或环境水文的具体过程和机理,仅根据所研究对象的系统输入和输出进行估算,因此,难以实现对生态水文或环境水文过程、分布、数量的科学认识。在目前的流域模型中,研究和应用较多的一般是集总式参数模型和分布式参数模型。

SWAT 模型属于分布式模型,它采用数学物理方法以离散化的方式描述流域空间尺度上水文要素和污染物质等参数的空间差异,在空间子单元上表示地形、土壤、植被等下垫面特征,降水、植被截留、蒸散发、下渗、地表径流和地下径流等水文特征,以及营养物质吸收、降解、硝化、存留等环境过程,不仅考虑了气象、水文、土壤、物理、化学、生物等自然过程,而且考虑了工业点源排放、农业养殖、城市扩张、人口增加、土地利用变化、农业种植制度和管理方式等人文过程。该模型具有以下特性^[2]:(a)在处理流域内部的地理要素和地理过程在时空上的非均一性和可变性时,以子流域的空间单元划分方法,将一个大区域或流域离散化成更小的地理单元——水文响应单元(HRUs)。在每个水文响应单元中,地形、土壤、土地利用等地理参数被看做是均一的,因而比较逼近水文或环境过程的真实性,有较强的物理基础。(b)比较适用于包含各种土壤类型、土地利用和农业管理制度的大流域,可以模拟和评估人类活动对水、沙、农业污染物的长期影响。(c)对营养物质模拟输出主要以氮和磷为主,包括有机氮、硝态氮、氨态氮、有机磷、矿物磷等变量。(d)模型的动力框架属时间连续的分布式模型,模拟的时间跨度可以以每日步长的方式从年、月到年代际。(e)与地理信息系统软件进行了集成,提升了空间数据前处理和后处理的能力,增强了可视化的操作功能和表达能力。

模型的结构主要由子流域、水库演算和河道演算 3 个模块组成,每个模块又由若干个子模块构成。譬如,子流域模块由水文、气象、泥沙沉积、土壤湿度、作物生长、营养盐、农业管理和农药/杀虫剂等 8 个子模块组成,而其中水文子模块又由地表径流、侧流、渗流、地下水、融雪、蒸散发、输移和池塘等组件构成。2009 版本已发展为由 705 个数学方程、1013 个中间变量组成的模型体系。其程序共由 306 个子程序组成,由 Fortran 语言开发编译而成,源代码可自由从 SWAT 网站下载。

1.2 SWAT 模型的开发与完善历程

SWAT 模型的发展经历了 30 多年的历史,USDA-ABS 开发 SWAT 模型可以追溯到早期开发的序列模型^[2],包括 CREAMS 模型、GLEAMS 模型、EPIC 模型。SWAT 模型的雏形是 SWRRB 模型,SWRRB 模型原本是为美国农业流域设计,用于模拟评估管理对水和沉积输移的影响,在原 SWAT 模型基础上进一步发展,主要是扩展了模拟的空间尺度与范围,增加了模拟的子流域数目,同时也运用 USDA-SCS 技术和新开发的沉积方程改善了地表径流中径流峰率的估算和输移损失的计算方法,并增加了地下水回流、水库储流、EPIC 农作物生长模块、天气产生器、沉积输移等多个模块。在 2005 版本中,模型增加了敏感性、率定和不确定性分析等自动功能。这些调整大幅度扩展了 SWAT 模型在流域水问题上的模拟能力。ROTO 模型的研发与引入使 SWAT 模型克服了 SWRRB 模型只能模拟 10 个子流域的局限^[3],使其能够在非常大的空间范围内应用。SWAT 模型

自开发以来,先后有多个更新版本,包括 SWAT 94.2、SWAT 96.2、SWAT 98.1、SWAT 99.2、SWAT 2000 和 SWAT 2005,目前发布的最新版本是 SWAT 2009. 由于 SWAT 模型的运行涉及大量的空间数据输入,因此,其与 GIS 的集成增强了空间数据前后处理的能力,使用户界面提升到以视窗平台为主的可视化界面. 最初的 SWAT 与 GIS 集成界面是 SWAT/GRASS,之后又开发集成了 AVSWAT 和 ArcSWAT.

1.3 SWAT 模型与其他主要模型的比较

在众多的集总式和分布式参数模型中,目前国内外广泛应用的包括 ANSWERS、CREAMS、GLEAMS、DWSM、MIKE SHE、AGNPS、EPIC 和 SWAT 等模型^[2]. CREAMS 和 GLEAMS 是农田尺度模型,不能直接用于流域尺度模拟,而 ANSWERS 模型和 AGNPS 模型没有考虑地下水过程. SWAT 模型和 HSPF 模型是美国环境保护总署指定的用于模拟全国性水文水质问题的模型,其中 HSPF 模型基本上是一个集总参数模型,无法模拟水文过程的空间变化. 此外, HSPF 模型没有考虑牲畜和乡镇农村居民的生活污水排放^[4]. 在 SWAT 与其他类似流域模型的应用比较中,大量的文献表明 SWAT 模型在不同程度上要优于 HSPF、DWSM、MIKE SHE、AGNPS 等模型^[5-6]. 张利平等^[7]对可变下渗能力水文模型 VIC 与 SWAT 模型进行过对比研究,表明 SWAT 模型的效率系数与相关系数较好. 但也有文献报道了相反的结果,如 Ahmed 等^[8]在模拟爱尔兰农业流域的磷流失时,对 SWAT 模型、HSPF 模型和 SHETRAN 模型的模拟效果进行了对比试验,结果表明 HSPF 模型在模拟逐日平均磷排放时效果好于 SWAT 模型和 SHETRAN 模型.

2 SWAT 模型在国内外不同领域的研究与应用

SWAT 模型自 20 世纪 90 年代由 USDA-ARS 开发以来,在国内外已广泛应用于水质和水量的模拟评估、非点源污染负荷估算及形成机制探讨、情景分析与预测、环境变化及农业管理措施对水文水质的影响、气候变化对区域水循环和作物生长的影响等多方面^[9],应用的流域尺度从几百平方千米到几十万平方千米不等,甚至大到国家级或大陆级空间尺度,如 Jayakrishnan 等^[10]将 SWAT 模型用于宏观地分析和评估美洲大陆或美国全国的水质、水量等水资源管理措施的效应;应用的时间尺度从某次降水过程的数小时、数天到几十年不等^[11]. 在众多的流域分布式模型中,SWAT 模型是目前最具代表性、使用最广泛、应用前景最广阔的分布式机理性模型^[12].

2.1 在国外的主要研究与应用

国外学者近年来运用 SWAT 模型开展了一系列研究,典型的如 Schmalz 等^[1]将 SWAT 模型应用于德国低地(其特征是平坦地形、浅地下水位、低水力梯度)的不同景观模拟,分析了模型的敏感性,发现在低地区域该模型对含水土层的地下水位极其敏感. Miseon 等^[13]在小尺度农业流域应用 SWAT 模型结合高分辨率的遥感数据对 4 种管理方案(植被过滤带管理、河岸缓冲区管理、通用土壤流失方程 P 因子调节、农作物施肥量控制)进行了评估,以分析最适宜管理措施的非点源减小效应. Fontaine 等^[14]、Jha 等^[15]利用 SWAT 模型通过气候要素输入中增加大气 CO₂ 浓度(影响植物发育和蒸腾)来研究气候变化对植物生长、河流水量等的影响. 此外,还有学者研究了大空间尺度背景下获取 SWAT 模型降雨数据的问题. 如 Jayakrishnan 等^[10]研究了 SWAT 模型与天气雷达降雨数据的集成(如 NEXRAD 或 WSR-88D),通过遥感技术估算大空间尺度的降雨数据,以解决实测降雨数据时空分辨率不足的问题,同时也可以解决无资料地区的降雨数据获取问题. 在研究气候变化方面,Muttiah 等^[11]应用 SWAT 模型模拟了 2040—2059 年的气候变化对 San Jacinto 流域的影响;Gosain 等^[16]应用 SWAT 模型模拟了印度 12 个主要流域 2041—2060 年气候变化情景对地表径流的影响. 此外,也有研究者利用 SWAT 模型与大气通用环流模型 AGCMs 和区域气候模型 RCMs 或与两者的耦合开展气候变化对水文的影响研究. 如 Rosenberg 等^[17]在 HUMUS 框架下利用 HadCM2 GCM 模型与 SWAT 模型耦合模拟了气候变化对水文的影响,其中气候变化情景还包含了 ENSO 的因素. Jha 等^[18]、Takle 等^[19]、Krysanova 等^[20]也分别采用 GCM 模型或 RegCM 模型与 SWAT 模型(或 SWIM 模型、SWAT-G 模型)等耦合模拟了气候变化情景对水循环和作物产量等的影响,其中有些模拟的时间跨度达到 30 a.

2.2 在国内的主要研究与应用

国内 SWAT 模型的研究和应用从 2000 年前后起步,经过快速发展,已广泛用于水量、泥沙和非点源污染的模拟. 研究区域涉及西北寒旱区(如黑河流域、黄河流域等)以及南方暖湿区(如太湖流域、鄱阳湖流域等). 研究领域包括水质和水量的定量模拟、土地利用变化及气候变化的水文响应、融雪和冻土对水文循环的影响

等.此外,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、与其他模型耦合、模型参数输入界面的集成与模型的相关完善等方面也进行了许多探讨.

在水质、水量及水资源的定量与影响因素模拟分析方面,郝芳华等^[21]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.王中根等^[22]在黑河干流山区莺落峡以上流域的模拟结果表明 SWAT 模型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.对于 SWAT 模型在大尺度流域上的应用方面,刘昌明等^[23]对黄河河源区流域进行了大空间尺度、不同土地覆盖和气候条件下的水文情景模拟,流域面积达 42.8 万 km².此外,赖格英等^[24-25]应用 SWAT 模型对太湖流域的营养物质输移进行模拟,分析人类活动背景下土地利用/覆盖、生活污水等对营养物质输移的影响,并在鄱阳湖梅江流域应用 SWAT 模型对土地利用/覆盖和植被覆盖度变化的水文响应进行模拟,结果表明,在土地利用与覆盖资料基础上增加植被覆盖度参与模拟会有很好的模拟效果.张永勇等^[26]应用 SWAT 模型探讨了北京市温榆河流域闸坝群对水文循环和污染物运移的作用,分析闸坝群对温榆河干流水量和水质浓度的影响,并将闸坝水量和水质联合调度模型、遗传算法耦合到流域综合管理模型 SWAT 中,从流域尺度上探讨闸坝的合理调度模式,在温榆河流域进行了实例研究^[27].张芳等^[28]运用 SWAT 模型模拟 ET,并进行县域水资源供耗平衡分析和优化配置.结果表明,模拟得到的 ET 比遥感提取的 ET 更合理地反映了实际耗水量.钱坤等^[29]运用 SWAT 模型对 2020 年及 2030 年在不同水资源管理措施下的情景方案进行模拟.为使蓝水绿水资源量统一纳入水资源评价与管理中,甄婷婷等^[30]将 SWAT 模型作为估算蓝水绿水资源量的工具之一.史伟达等^[31]以我国南方典型水稻种植区漳河灌区的小流域作为研究区,基于改进的 SWAT 模型,分析了不同施肥制度下的氮、磷负荷排放规律.陈莹等^[32]以长江三角洲地区太湖上游的西苕溪流域为研究区,利用 SWAT 模型结合未来 4 种城镇化情景,模拟分析未来城镇化的长期水文效应.王艳君等^[33]以城市化流域为例,采用 SWAT 模型对流域的土地利用变化对水文过程的影响进行了研究.李明星等^[34]以陕西为研究区,运用 SWAT 模型模拟研究了区域 54 a (1951—2004 年)的土壤总含水量、各层含水量和土壤蒸发日值等的时空变化.

在气候变化的水文响应方面,张建云等^[35]、冯夏清等^[36]、顾万龙等^[37]先后应用 SWAT 模型研究气候变化、LUCC 等对水资源的影响.此外,翟家齐等^[38]利用 SWAT 模拟分析南水北调中线水源区丹江口水库在不同气候变化以及土地利用变化情景下的供水水文风险.翟晓燕等^[39]运用 SWAT 模型,并通过 LA-OAT 法的参数敏感性分析和数字滤波基流分割技术,分析了 35 种气候变化情景对沙澧河流域径流的影响.李志等^[40]基于 4 种全球环流模式(CCSR/NIES,CGCM2,CSIRO-Mk2 和 HadCM3)的各 3 种排放情景(A2,B2 和 GgA),利用 SWAT 模型模拟气候变化的水文响应,评估了 2010—2039 年气候变化对黄土高原黑河流域水资源的可能影响.张利平等^[41]以南水北调中线工程水源区为研究流域,根据 IPCC 第 4 次评估报告多模式结果,应用 SWAT 模型模拟分析了 IPCC SRES 第 4 次评估报告中假定的注重经济增长的全球共同发展情景(A1B,中等排放)和注重经济增长的区域发展情景(A2,高排放)下 2011—2050 年的降水、气温、径流的响应过程.

近年来 SWAT 模型的应用除了传统的水文水循环领域外,还扩展到其他方面.如曾昭霞等^[42]运用 SWAT 模型研究小流域粮食产量稳定与施肥空间优化调整的关系.梁犁丽等^[43]基于 SWAT 模型模拟分析鄂尔多斯遗鸥保护区湖泊湿地集水区的生态需水量.王军德等^[44]将 SWAT 模型应用于西北干旱区祁连山系杂木河流域的最佳水源涵养效应生态模式研究.杜丽娟等^[45]引入效益分摊系数计算不同情景潘家口水库对上游地区的补偿标准,将 SWAT 模型用于水土保持生态补偿标准的核算.

2.3 对 SWAT 模型的修正和与其他模型的耦合

为适应不同的应用目标和增强 SWAT 模型的可操作性,国内外学者在应用过程中进行了 SWAT 模型与其他模型的耦合集成研究,并对该模型进行了不同程度的修正.van Griensven 等^[46-48]在研究比利时的 Dender 和 Wister 湖流域时,把 Qual2E 模型集成到 SWAT 模型中,对模型“小时时间步长”动力框架进行了修正,增强了 SWAT 模型的水质模拟功能,形成了 ESWAT 模型.George 等^[49]用 WaterBase 工程,在开源的 GIS MapWindows 平台上以插件的方式开发集成了 MWSWAT 模型.此外,国内外还先后开发了一系列辅助工具,以支持 SWAT 模型的运行,如交互的 SWAT 软件(iSWAT,该软件将 Windows 界面与 Access 数据库连接).RAO 等^[50]开发的 CRP-DSS 决策支持系统、Kannan 等^[51]开发的 AUTORUN 系统、自动参数选择与聚类的 SWAT 模拟效检工具^[52](iSWAT).此外,SWAT 植物生长模型的缺陷导致了多位学者开展了对此进行修正的探索性研

研究,如 Watson 等^[53]和 McDonald 等^[54]引入了森林生长的机理模型 3-PG 来代替 SWAT 植物生长模型;Kiniy 等^[55]也提出通过引进并修正 ALMANAC 植物模型以改善 SWAT 模型在模拟森林生态系统有关水和生物地球化学循环方面不足的方法。

近年来国内学者在这方面也做了大量探索,桑学锋等^[56]以 SWAT 模型、人工水平衡 AWB 模型及地下水 MODFLOW 模型为基础,耦合构建了基于广义 *ET* 的区域水资源与水环境综合模拟模型。吴挺峰等^[57]将 SWAT 模型与垂向二维富营养化水体模型相集成,构成了适用于狭长河流型水库的流域富营养化模型。代俊峰等^[58]针对中国南方丘陵水稻灌区的水文特点,改进了 SWAT 模型的灌溉水运动模块、以及稻田水分循环模块、稻田水量平衡各要素和产量模拟的计算方法,增加了渠系渗漏模拟模块及其对地下水的补给作用、塘堰的灌溉模块等。谢先红等^[59]在稻田蒸发蒸腾、控制灌溉排水、塘堰实时灌溉等方面对 SWAT 模型进行了改进,使其可以模拟“间歇”、“淹灌”和“薄浅湿晒”等灌溉模式的水稻灌区水分运动过程。陈强等^[60]将 PSO 算法代替 SWAT 模型原有的 SCE 自动率定算法,构建了新的 SWAT 模型参数自动率定模块,并利用改进的 SWAT 模型多水源灌溉模块,将水资源配置模型的农业灌溉用水展布到改进后的 SWAT 模型中,实现 2 个模型的松散式耦合^[61]。李硕等^[62]提出通用输入文件定制模型集成方案,并利用动态链接库技术开发了 1 套 SWAT 模型输入文件定制类库和输入模型参数调整的功能模块。仕玉治等^[63]针对灌溉资料相对缺乏流域,以 SWAT 模型为基础,修改了水稻田的自动灌溉制度,并构建了多水源综合灌溉模块。张雪刚等^[64]将 SWAT 模型与地下水 MODFLOW 模型进行耦合,以其水文响应单元和 MODFLOW 模型的有限差分网格作为基本交换单元,将 SWAT 模型模拟计算的地下水补给量和潜水蒸发量引入 MODFLOW 模型的地下水补给模块和潜水蒸发模块中。初京刚等^[65]开展了将 SWAT 模型与 MODFLOW 模型耦合进行地表水与地下水联合模拟的研究,提出了在 ARC-SWAT 2005 环境下 2 种耦合模型中计算单元(分别为水文响应单元和网格)转换的方法。郑捷等^[66]针对平原型灌区人工-自然复合的水文循环特点,考虑平原灌区灌溉渠道、排水沟和河道等人工干扰,在沟渠河网的提取方法、子流域与水文响应单元的划分以及作物耗水量计算模块等方面对 SWAT 模型进行了改进。

值得一提的是,在大量的 SWAT 模型的应用研究中,也有国内外学者报道了 SWAT 模型适应性方面存在的问题。如 Schmalz 等^[67]在德国北部的应用表明,SWAT 模型在模拟平坦、低水力梯度、浅地下水位的湖泊泥炭型地区水文过程时存在较大的不确定性。Hattermann 等^[68]的研究表明 SWAT 模型在模拟湿地过程时存在不足。程磊等^[69]将 SWAT 模型应用到黄河中游干旱、半干旱区多沙和粗沙典型流域时,SWAT 模型产流机制不能有效模拟干旱、半干旱地区的窟野河流域的壤中流、基流和春汛流量过程。

3 结 语

近年来 SWAT 模型在国内外的应用及进行的不断修正表明,该模型在不同地区、不同应用领域的适应性是不同的,从总的情况来看,它比较适用于土地利用/覆盖、土壤、气象条件农业管理方式等对流域水文水质的长期影响评估模拟,同时也说明该模型具有很强的可塑性,因而表现出强大的生命力。由于应用领域的扩展和需求的不同,未来 SWAT 模型在适应性、可靠性、可操作性等方面会有不同的修正和深化,如在植物生长模型多样性方面,牲畜摄食与排泄、人畜粪便有机肥对营养物质循环与输移的影响,土壤碳、氮、磷循环过程的进一步改善,植物生长数据库及其相关参数的扩充和丰富,地下水及其氮、磷的流失,大气 CO_2 对植物生长的影响,模型的自动敏感性分析、参数率定和输入不确定性分析的进一步深入研究,以及该模型与 GIS 集成及人机界面的友好与易用性方面等内容。

参考文献:

- [1] SCHMALZ B, FOHRER N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT mode[J]. *Advances in Geosciences*, 2009, 21: 91-98.
- [2] MUTTIAH R S, ARNOLD J G, SRINIVASAN R, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34: 73-89.
- [3] ARNOLD J G, ALLEN P M, MUTTIAH R S, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. *Groundwater*, 1995, 33(6): 1010-1018.

- [4] HE C , CROLEY T E. Distributed-parameter large basin runoff model I : model developmen[J]. Journal of Hydrologic Engineering , 2005 , 5(5) : 173-181.
- [5] BERA M , BORAH D K. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models : review of applications[J]. Transactions of the ASABE , 2004 , 47(3) : 789-803.
- [6] ARNOLD J G , van LIEW M W , GARBRECHT J D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds : choosing between two models[J]. Transactions of the ASABE , 2003 , 46(6) : 1539-1551.
- [7] 张利平 , 陈小凤 , 张晓琳. VIC 模型与 SWAT 模型在中小流域径流模拟中的对比研究[J]. 长江流域资源与环境 , 2009 , 18(8) : 745-752. (ZHANG Li-ping , CHEN Xiao-feng , ZHANG Xiao-lin. A compare application research of vic model and swat model in the mid-small valley flow simulation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin , 2009 , 18(8) : 745-752. (in Chinese))
- [8] AHMED E N , MICHAEL B , PHILIP J , et al. A comparison of SWAT , HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland[J]. Water Research , 2007 , 41(5) : 1065-1073.
- [9] GASSMAN P W , REYES M R , GREEN C H , et al. The soil and water assessment tool : historical development , applications and future research direction[J]. Transactions of the ASABE , 2007 , 50(4) : 1211-1250.
- [10] JAYAKRISHNAN R , SRINIVASAN R , SANTHI C , et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management[J]. Hydrol Process , 2005 , 19 : 749-762.
- [11] MUTTIAH R S , WURBS R A. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities[J]. Water Resources Assoc , 2002 , 27(3) : 407-419.
- [12] KRYSAKOVA V , ARNOLD J G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT-a review[J]. Hydrological Sciences Journal , 2008 , 53(5) : 939-947.
- [13] MISEON L , GEUNAE P , MINJI P , et al. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imager[J]. Journal of Environmental Sciences , 2010 , 22(6) : 826-833.
- [14] FONTAINE T A , CRUICKSHANK T S , ARNOLD J G , et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil and water assessment tool(SWAT) [J]. J Hydrol , 2002 , 262(1/2/3/4) : 209-223.
- [15] JHA M , GASSMAN P W , SECCHI S , et al. Effect of watershed subdivision on SWAT flow , sediment , and nutrient predictions[J]. J American Water Resour Assoc , 2004 , 40(3) : 811-825.
- [16] GOSAIN A K , RAO S , BASURAY D. Climate change impact assessment on hydrology of Indian River Basins[J]. Current Sci , 2006 , 90(3) : 346-353.
- [17] ROSENBERG N J , BROWN R A , IZAURRALDE R C , et al. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections in agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States : I . Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS mode[J]. Agric For Meteorol , 2003 , 117(1/2) : 73-96.
- [18] JHA M , ARNOLD J G , GASSMAN P W , et al. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi River Basin streamflows using SWAT[J]. J American Water Resour Assoc , 2006 , 42(4) : 997-1015.
- [19] TAKLE E S , JHA M , ANDERSON C J. Hydrological cycle in the upper Mississippi River Basin : 20th century simulations by multiple GCM[J]. Geophys Res Letters , 2005 , 32(18) : L18407. 1-L18407.5.
- [20] KRYSAKOVA V , HATTERMAN F , WECHSUNG F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment[J]. Hydrol Process , 2005 , 19(3) : 763-783.
- [21] 郝芳华 , 程红光 , 杨胜天. 非点源污染模型 : 理论与应用[M]. 北京 : 中国环境科学出版社 , 2006.
- [22] 王中根 , 郑红星 , 刘昌明 , 等. 黄河典型流域分布式水文模型及应用研究[J]. 中国科学 E 辑 : 技术科学 , 2004 , 34(增刊 I) : 49-59. (WANG Zhong-gen , ZHENG Hong-xing , LIU Chang-ming , et al. A distributed hydrological model of A basin in Yellow River and its application research[J]. Science in China Ser E : Technological Sciences , 2004 , 34(Sup I) : 49-59. (in Chinese))
- [23] 刘昌明 , 李道峰 , 田英. 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. (LIU Chang-ming , LI Dao-feng , TIAN Ying. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed[J]. Progress in Geography , 2003 , 22(5) : 437-445. (in Chinese))
- [24] 赖格英 , 于革. 太湖流域营养物质输移模拟评估的初步研究[J]. 中国科学 D 辑 : 地球科学 , 2005 , 35(增刊 II) : 121-130. (LAI Ge-ying , YU Ge. Preliminary study on assessment of nutrient transport in Taihu Basin based on simulation[J]. Science in China Ser D : Earth Sciences , 2005 , 35(Sup II) : 121-130. (in Chinese))
- [25] 赖格英 , 刘志勇 , 刘胤雯. 流域土地利用覆盖与植被变化的水文响应模拟研究[J]. 水土保持研究 , 2008 , 15(4) : 10-14. (LAI Ge-ying , LIU Zhi-yong , LIU Yin-wen. A simulation-based research on the hydrological response of land use/cover and vegetation changes in watershed scale[J]. Research of Soil and Water Conservation , 2008 , 15(4) : 10-14. (in Chinese))

- [26] 张永勇,陈军锋,夏军,等. 温榆河流域闸坝群对河流水量水质影响分析[J]. 自然资源学报,2009,24(10):1697-1705. (ZHANG Yong-yong, CHEN Jun-feng, XIA Jun, et al. Research on the impact of dams and floodgates on riverine runoff and water quality in Wenyu River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(10):1697-1705. (in Chinese))
- [27] 张永勇,夏军,陈军锋,等. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究[J]. 水力发电学报,2010,29(5):159-177. (ZHANG Yong-yong, XIA Jun, CHEN Jun-feng, et al. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT mode[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5):159-177. (in Chinese))
- [28] 张芳,徐建新,魏义长,等. 基于 ET 管理的县域水资源合理配置研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):107-110. (ZHANG Fang, XU Jian-xin, WEI Yi-chang, et al. Optimal allocation of water resources based on et management in county-level region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2):107-110. (in Chinese))
- [29] 钱坤,叶水根,朱琴. 基于 SWAT 模型的房山区不同情景方案下的蒸腾蒸发模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(1):99-105. (QIAN Kun, YE Shui-gen, ZHU Qin. Evapotranspiration simulation with different scenarios analyses of Fangshan District by SWAT mode[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):99-105. (in Chinese))
- [30] 甄婷婷,徐宗学,程磊,等. 蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究:以卢氏流域为例[J]. 资源科学,2010,32(6):1177-1183. (ZHEN Ting-ting, XU Zong-xue, CHENG Lei, et al. Spatiotemporal distributions of blue and green water resources: a case study on the lushui watershed[J]. Resources Science, 2010, 32(6):1177-1183. (in Chinese))
- [31] 史伟达,崔远来,王建鹏,等. 不同施肥制度下水稻灌区面源污染排放的数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):23-26. (SHI Wei-da, CUI Yuan-lai, WANG Jian-peng, et al. Simulation of different fertilizer application regimes impact on agricultural non-point source pollution in rice irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2):23-26. (in Chinese))
- [32] 陈莹,许有鹏,陈兴伟. 长江三角洲地区中小流域未来城镇化的水文效应[J]. 资源科学,2011,33(1):64-69. (CHEN Ying, XU You-peng, CHEN Xing-wei. Hydrologic response to future urbanization in small or medium basins in the yangtze river delta region [J]. Resources Science, 2011, 33(1):64-69. (in Chinese))
- [33] 王艳君,吕宏军,施雅风,等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响:以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报,2009,24(1):30-36. (WANG Yan-jun, LV Hong-jun, SHI Ya-feng, et al. Impacts of land use changes on hydrological processes in an urbanized basin: a case study in the qinhuai river basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1):30-36. (in Chinese))
- [34] 李明星,马柱国,杜继稳. 区域土壤湿度模拟检验和趋势分析:以陕西省为例[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2010,40(3):363-379. (LI Ming-xin, MA Zhu-gou, DU Ji-wen. Regional soil moisture simulation for Shaanxi Province using SWAT model validation and trend analysis[J]. Science in China Ser D:Earth Sciences, 2010, 40(3):363-379. (in Chinese))
- [35] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [36] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展,2010,29(7):827-832. (FENG Xia-qing, ZHANG Guang-xin, YIN Xiong-rui. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur River Basin based on the SWAT mode[J]. Progress in Geography, 2010, 29(7):827-832. (in Chinese))
- [37] 顾万龙,竹磊磊,许红梅,等. SWAT 模型在气候变化对水资源影响研究中的应用:以河南省中部农业区为例[J]. 生态学杂志,2010,29(2):395-400. (GU Wan-long, ZHU Lei-lei, XU Hong-mei, et al. Application of soil and water assessment tool (SWAT) model in the research of the effects of climate change on water resources: a case study in central agricultural area of Henan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(2):395-400. (in Chinese))
- [38] 翟家齐,赵勇,裴源生. 南水北调中线水源区供水水文风险因子分析[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(4):13-16. (ZHAI Jia-qi, ZHAO Yong, PEI Yuan-sheng. Research on hydrological risk factors of water supply of the Source of Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4):13-16. (in Chinese))
- [39] 翟晓燕,夏军,张永勇. 基于 SWAT 模型的沙澧河流域径流模拟[J]. 武汉大学学报:工学版,2011,44(2):142-155. (ZHAI Xiao-yan, XIA Jun, ZHANG Yong-yong. Runoff simulation of Shali River Basin based on SWAT model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2):142-155. (in Chinese))
- [40] 李志,刘文兆,张勛昌,等. 气候变化对黄土高原黑河流域水资源影响的评估与调控[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2010,40(3):352-362. (LI Zhi, LIU Wen-zhao, ZHANG Xun-chang, et al. Assessing and regulating the impacts of climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau of China[J]. Science in China Ser D:Earth Sciences, 2010, 40(3):352-362. (in Chinese))
- [41] 张利平,胡志芳,秦琳琳,等. 2050 年前南水北调中线工程水源区地表径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2010,6(6):391-397. (ZHANG Li-ping, HU Zhi-fang, QIN Lin-lin, et al. Surface runoff changes in the water source area for the Middle Route Project of South-to-North Water Transfer before 2050[J]. Adv Clim Change Res, 2010, 6(6):391-397. (in Chinese))
- [42] 曾昭霞,刘孝利,王克林,等. 农业小流域粮食产量稳定与水环境质量提高途径研究[J]. 环境科学,2010,31(8):1784-1788.

- (ZENG Zhao-xia , LIU Xiao-li , WANG Ke-lin , et al. Strategy of grain yield stability cooperated with harmonious water environment quality of small agricultural watershed[J]. Environmental Science , 2010 , 31(8) : 1784-1788. (in Chinese))
- [43] 梁犁丽 , 王芳 . 鄂尔多斯遗鸥保护区植被-水资源模拟及其调控[J]. 生态学报 , 2010 , 30(1) : 109-119. (LIANG Li-li , WANG Fang . Simulation of water resources evolution driven by vegetation construction and control of eco-hydrological processes in Erdos Larus Relictus Nature Reserv[J]. Acta Ecologica Sinica , 2010 , 30(1) : 109-119. (in Chinese))
- [44] 王军德 , 李元红 , 李赞堂 , 等 . 基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究 : 以石羊河上游杂木河流域为例[J]. 生态学报 , 2010 , 30(21) : 5875-5885. (WANG Jun-de , LI Yuan-hong , LI Zan-tang , et al. Optimization of vegetation covers in Qilian Mountains based on hydrological responses by SWAT model : a case study of Zamu River Basin in upper Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica , 2010 , 30(21) : 5875-5885. (in Chinese))
- [45] 杜丽娟 , 王秀茹 , 刘钰 . 水土保持生态补偿标准的计算[J]. 水利学报 , 2010 , 41(11) : 1346-1352. (DU Li-juan , WANG Xiu-ru , LIU Yu . Ecological compensate standard accounting of soil and water conservation[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2011 , 41(11) : 1346-1352. (in Chinese))
- [46] van GRIENSVEN A , BAUWENS W . Application and evaluation of ESWAT on the Dender Basin and Wister , and Lake Basin[J]. Hydrol Processes , 2005 , 19(3) : 827-838.
- [47] van GRIENSVEN A , MEIXNER T . Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin , and water quality models [J]. Water Sci Tech , 2006 , 53(1) : 51-59.
- [48] van GRIENSVEN A , MEIXNER T , SRINIVASAN R , et al . Fit-for-purpose analysis of uncertainty using split-sampling evaluations[J]. Hydrol Sci J , 2008 , 53(5) : 1090-1103.
- [49] GEORGE C , LEON L F . WaterBase : SWAT in an open source GIS[J]. The Open Hydrology Journal , 2007 , 1 : 19-24.
- [50] RAO M , FAN G , THOMAS J , et al . A web-based GIS decision support system for managing and planning USDA 's Conservation Reserve Program(CRP) [J]. Environ Model Soft , 2006 , 22(9) : 1270-1280.
- [51] KANNAN N , WHITE S M , WORRALL F , et al . Pesticide modeling for a small catchment using SWAT-2000[J]. Environ Sci Health : Part B , 2006 , 41(7) : 1049-1070.
- [52] ABBASPOUR K C , YANG J , MAXIMOV I , et al . Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. J Hydrol , 2007 , 333(2/3/4) : 413-430.
- [53] WATSON B M , COOPS N , SELVALINGAM S , et al . Integration of 3-PG into SWAT to simulate growth of evergreen forests in Australia Lake Basin[J]. Hydro , 2005 , 19(3) : 827-838.
- [54] McDONALD D , KINIRY J , ARNOLD J , et al . Developing parameters to simulate trees with SWAT[C]//ABBASPOUR K , SRINIVASAN R . Proceedings of the 3rd International SWAT Conference. Zürich : Glodach Press , 2005 : 231-256.
- [55] KINIRY J R , MACDONALD J D , KEMANIAN A R , et al . Plant growth , and simulation for landscape-scale hydrological modeling[J]. Hydrol Sci J , 2008 , 53(5) : 1030-1042.
- [56] 桑学锋 , 周祖昊 , 秦大庸 , 等 . 基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划研究 II : 模型[J]. 水利学报 , 2009 , 40(10) : 1153-1161. (SANG Xue-feng , ZHOU Zu-hao , QIN Da-yong , et al . Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation transpiration water consumption control II . Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2009 , 40(10) : 1153-1161. (in Chinese))
- [57] 吴挺峰 , 高光 , 晁建颖 , 等 . 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策[J]. 水利学报 , 2009 , 40(4) : 391-397. (WU Ting-feng , GAO Guang , CHAO Jian-ying , et al . Analysis on factors inducing algal bloom in reservoir based on basin eutrophication mode[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2009 , 40(4) : 391-397. (in Chinese))
- [58] 代俊峰 , 崔远来 . 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型 : I 模型构建的原理与方法[J]. 水利学报 , 2009 , 40(2) : 145-152. (DAI Jun-feng , CUI Yuan-lai . Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT : I principle and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2009 , 40(2) : 145-152. (in Chinese))
- [59] 谢先红 , 崔远来 . 典型灌溉模式下灌溉水利用效率尺度变化模拟[J]. 武汉大学学报 : 工学版 , 2009 , 42(5) : 653-660. (XIE Xian-hong , CUI Yuan-lai . Analysis of scaling variation of irrigation water use efficiency under typical irrigation regimes[J]. Engineering Journal of Wuhan University , 42(5) : 653-660. (in Chinese))
- [60] 陈强 , 苟思 , 秦大庸 , 等 . 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报 , 2010 , 41(1) : 113-119. (CHEN Qiang , GOU Si , QIN Da-yong , et al . A high efficiency auto-calibration method for SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2010 , 41(1) : 113-119. (in Chinese))
- [61] 陈强 , 秦大庸 , 苟思 , 等 . SWAT 模型与水资源配置模型的耦合研究[J]. 灌溉排水学报 , 2011 , 29(1) : 19-22. (CHEN Qiang , QIN Da-yong , GOU Si , et al . Research of the coupling of SWAT model and water allocation model[J]. Journal of Irrigation and

Drainage ,2010 29(1):19-22. (in Chinese))

[62]李硕 ,康杰伟 ,王志华 .基于输入文件定制的 SWAT 模型集成应用方法研究[J].地理与地理信息科学 ,2010 26(4):16-20. (LI Shuo ,KANG Jie-wei ,WANG Zhi-hua. Customization of input data for integrated application of SWAT mode[J]. Geography and Geo-information Science ,2010 26(4):16-20. (in Chinese))

[63]仕玉治 ,张弛 ,周惠成 ,等 .SWAT 模型在水稻灌区的改进及应用研究[J].水电能源科学 ,2010 28(7):18-22.(SHI Yu-zhi ,ZHANG Chi ,ZHOU Hui-cheng ,et al. Development and application of SWAT model to paddy district in watershed scale[J]. Water Resources and Power ,2010 28(7):18-22. (in Chinese))

[64]张雪刚 ,毛媛媛 ,董家瑞 .SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用[J].水资源保护 ,2010 26(3):49-52.(ZHANG Xue-gang ,MAO Yuan-yuan ,DONG Jia-rui. A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW[J]. Water Resources Protection ,2010 26(3):49-52. (in Chinese))

[65]初京刚 ,张弛 ,周惠成 .SWAT 与 MODFLOW 模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J]. 地理科学进展 ,2011 30(3):335-342.(CHU Jing-gang ,ZHANG Chi ,ZHOU Hui-cheng. Research and application of interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling[J]. Progress in Geography ,2011 30(3)335-342. (in Chinese))

[66]郑捷 ,李光永 ,韩振中 ,等 .改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用[J].水利学报 ,2011 42(1):88-97. (ZHENG Jie ,LI Guang-yong ,HAN Zhen-zhong ,et al. Application of modified SWAT model in plain irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2011 42(1)88-97. (in Chinese))

[67]SCHMALZ B ,TAVARES F ,FOHRER N. Modelling hydrological processes in mesoscale lowland river basins , and with SWAT-capabilities and challenges[J]. Hydrol Sci J 2008 53(5):989.

[68]HATTERMANN F ,KRYSAKOVA F ,HESSE V C. Modelling wetland processes in regional applications[J]. Hydrol Sci J ,2008 53(5):1001-1012.

[69]程磊 ,徐宗学 ,罗睿 ,等 .SWAT 在干旱半干旱地区的应用 :以窟野河流域为例[J].地理研究 ,2009 28(1):65-73.(CHENG Lei ,XU Zong-xue ,LUO Rui ,et al. SWAT application in arid and semi-arid region : a case study in the Kuye River Basin[J]. Geographical Research ,2009 28(1)65-73. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学召开“ 分数阶动力学最新进展 ” 中德双边学术研讨会

在国家自然科学基金委中德科学中心全额资助下 ,“ 分数阶动力学最新进展(Sino-German Bilateral Symposium on Fractional Dynamics : Recent Advances)” 中德双边学术研讨会于 2012 年 5 月13—18 日在河海大学举行 .会议旨在增进中德两国分数阶动力学研究学者之间的学术交流 ,为中德学者间的进一步合作创造条件 ,促进双边人员往来与交流 .7 名德国教授、15 名中国学者以及第三方邀请国 3 名以色列教授参加了会议 .

中德科学中心常务副主任陈乐生致开幕词 ,对出席会议的海内外知名学者表示欢迎和感谢 ,并希望中德学者间能进一步加强学术交流 ,双方科学家能够进一步申请双边合作项目 .

会上 ,兰州大学邓伟华教授和德国 Metzler 教授分别对研讨会的主题、背景等做了介绍 .会议围绕分数阶动力学的理论分析、数值算法和应用研究开展了广泛的学术交流 ,并探讨了今后的主要研究发展方向 .

“ 分数阶动力学最新进展 ”中德双边学术研讨会的成功举办促进了河海大学力学学科的对外交流 ,拓宽了师生的国际学术视野 ,活跃了学术氛围 ,同时增进了中国、德国、以色列学者在分数阶动力学领域的学术交流 ,为进一步合作打下了良好的基础 .

(本刊编辑部供稿)