

SWAT 模型应用与不确定性综述

杨凯杰^{1,2}, 吕昌河^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是对大尺度复杂流域进行长时期水文模拟的重要工具,在水文循环、土壤侵蚀、污染物负荷、气候变化与土地利用变化的影响等方面得到广泛应用。SWAT 模型在国内外流域模拟中取得良好的模拟效果,但不确定性问题普遍存在。从模型使用者的视角,针对输入数据的准备、子流域划分和输入数据尺度转换、模型参数校准 3 个 SWAT 模型应用的重要步骤,讨论了其主要不确定性来源。模型输入数据精度不足以准确反映其空间差异,模拟单元划分粗略导致输入数据向模拟单元尺度转换时参数集总程度过高,模型参数校准过程中观测数据和评价指标的不合理选择以及异参同效现象。对此,总结提出了降低不确定性、提高模拟精度的主要措施:提高输入数据的分辨率和模拟单元划分精度至理想阈值,对模型的关键参数和部分计算方法进行本地化,采用多重评价指标、自动校准与人工校准相结合以及多要素、多站点的参数校准方法。把握模型应用主要步骤中可能的不确定性来源,并结合具体研究区特征和研究目标采取相应的措施降低不确定性,是提高 SWAT 模型模拟结果可信度的必要途径。

关键词: SWAT 模型; 应用领域; 不确定性; 数据精度; 尺度转换; 模型校准

中图分类号: P933

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0017-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.004

Reviews on Application and Uncertainty of SWAT Model

YANG Kaijie^{1,2}, LÜ Changhe^{1,3}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural

Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model is a useful tool for long term hydrological simulation in large scale and complicated watersheds. SWAT model has been widely used in research of hydrological cycle, soil erosion, pollution loads, and impact of climate and land use change. This model has achieved good simulation results, but the uncertainty is widespread. From the perspective of the model user, this paper discussed the main sources of uncertainty through the three important steps in using SWAT model, including input data preparation, sub-watershed delineation and data scale transformation, and model calibration. Input data with insufficient precision is one of the main uncertainty sources, owing to its inability to represent the spatial variability. Insufficient precision of sub-watershed delineation would cause over-lump of parameters during scale transformation, thus cause simulation errors. In calibration process, uncertainty is mainly induced by usage of inappropriate observation and evaluation index, and equifinality. A group of measures is suggested to reduce modeling uncertainties. Increasing resolution of input data and precision of watershed delineation to a certain threshold would reduce input uncertainty. Localization of key parameters and simulation functions based on local literature and expert knowledge can effectively reduce equifinality. And using multiple evaluation indices, automatic calibration combined with manual calibration, and calibration for multi factors and multi stations can limit calibration uncertainty. Grasping the possible uncertainty sources of the main steps during the model applying, taking corresponding measures to reduce uncertainty according to the study area's specific characteristics and research goals, is the necessary way to improve the credibility of the

收稿日期: 2017-09-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604701); 国家自然科学基金项目(41671093)

第一作者: 杨凯杰(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事气候和土地利用变化影响研究。E-mail: kaijieyoung@163.com

通信作者: 吕昌河(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土地资源与土地利用、退化土地恢复、农业系统分析研究。E-mail: luch@igsrr.ac.cn

simulation results of SWAT model.

Keywords: SWAT model; model application; uncertainty; data resolution; scale transformation; model calibration

分布式水文物理模型是研究流域水文、生态、环境问题重要的工具^[1]。因模型对空间数据要求高、计算量大,其应用受到一定制约。近年来,遥感影像、雷达观测等空间数据获取技术的成熟和计算速率的提升,为分布式水文物理模型提供了硬件和数据支持,包括 SWAT、IHDM、TOPMODEL 和 SHE 等水文模型应用得到极大发展,在世界得到广泛应用^[2]。其中,SWAT 模型通过引入水文响应单元代替栅格计算,平衡了分布式模型过大的计算量,在大尺度复杂流域的长时期水文模拟中具有显著优势^[3]。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是在日降雨水文模型 CREAMS 的基础上发展起来的^[4],19 世纪 80 年代融入 EPIC 作物生长模块后更名为 SWRRB^[5],之后又融合了河道演算模块 RO-TO^[6],形成了最初版本的 SWAT 模型^[3]。此后,经过一系列测试和改进,于 1994 年 SWAT 实现了与地理信息系统的耦合^[7]。作为一个开源模型,SWAT 可在官方网站免费下载(<http://swat.tamu.edu>),在世界各地得到广泛应用。目前在 SWAT 模型文献数据库中已收录了超过 2 700 篇同行审阅的期刊文献,在不同流域规模、气候条件和水文地质条件的流域应用中取得良好的模拟效果^[8-9]。由于模型结构复杂、参数量大,SWAT 模型的模拟结果存在较大的不确定性^[10],限制了模拟结果的可信度和实用性,是目前 SWAT 模型应用的难点所在。本文首先综述了 SWAT 模型的主要应用领域及其在中国的应用概况,然后对 SWAT 模型可能的不确定性来源进行了分析讨论,并从模型使用者的视角,总结提出了相应的降低不确定性的方法。

1 模型应用

SWAT 模型的应用主要集中在流域水文循环、土壤侵蚀、污染物负荷、碳氮循环,以及气候变化、土地利用变化的影响等方面。水文循环模拟是 SWAT 模型最主要的应用领域,可以模拟流域水量平衡,估算径流、蒸发等水分循环分量^[11-12],评估流域蓝、绿水资源分配等^[13-14]。SWAT 模型内嵌侵蚀模块可模拟土壤侵蚀和流域输沙量^[15-16],识别侵蚀易发区,为土壤侵蚀治理划分优先级别^[15,17]。SWAT 模型还可以模拟污染物在土壤剖面和水体中的迁移转化过程,识别非点源污染的关键源区^[18-19],分析污染物主要流通途径^[20],评估管理措施的实施效果^[21],指导污染防治措施合理布局^[22]。在污染物模拟中,氮磷等营养元

素负荷的模拟应用最为广泛,为预测湖泊、水库等水体的富营养化状况、制定水质修复措施提供科学依据^[23-24];此外,该模型还应用于杀虫剂和微生物的模拟分析^[25-27]。SWAT 模型另一个主要的应用领域是对过去气候变化和土地利用变化影响的归因分析。由于气候变化和土地利用变化间具有相互作用,且流域水文循环系统对两者的响应非线性,因此其综合影响并不是各自的简单相加^[28]。SWAT 模型可通过改变某一种因素而保持其他因素不变的方法来进行归因分析,探究其中的主导要素,评估两者的相对贡献^[29-30]。未来综合情景分析是 SWAT 模型最重要的应用领域之一,通过设置未来气候变化和土地利用变化情景组合,应用该模型分析目标变量未来可能的变化范围^[31-32],满足全球变化背景下的风险评估、政策制定等现实需求,还可以根据研究目标增加情景组合维度,进行不同气候、土地利用、管理措施及水文状况的综合情景分析^[33]。

我国科研工作者在 21 世纪初就将 SWAT 模型应用于江西潦水河流域径流泥沙模拟^[34]和官厅水库非点源污染研究^[35]。SWAT 模型在中国的应用涉及水文模拟^[36-37]、侵蚀模拟^[38-39]、污染物模拟^[40-41]、气候变化和土地利用变化影响^[37]等方面。总体来看,以水文模拟应用最多,泥沙模拟次之,污染物模拟较少。原因是水文模拟所需要的输入参数较少且容易获取,校准所需的水文监测数据的精度较高;而泥沙和污染物模拟涉及更复杂的物理化学过程,对输入数据空间精度和准确度要求较高,但我国相应的基础研究数据缺乏,监测站点密度较低,给模型在此类研究中的应用带来一定困难。另外,SWAT 模型的结构、应用公式和数据库等均是基于美国的相关研究建立的,而中国地域广阔,流域特征多变,模型在中国的应用过程中出现一定程度的不适用问题。对模型进行适用性分析和模块改进,如坡长计算、灌溉、融雪等模块^[42-43],以适应我国的特定流域,成为 SWAT 模型在中国应用的重要方面。

2 模型不确定性来源与误差

从模型使用者的视角,针对输入数据的准备、子流域划分和输入数据的尺度转换、模型参数校准 3 个 SWAT 模型应用的重要步骤,总结模型的不确定性来源,并提出相应的降低不确定性、提高模拟精度的方法,以期为模型使用者提供参考(表 1)。

表 1 SWAT 模型应用重要步骤中的不确定性来源和降低不确定性的措施

SWAT 模型应用步骤	不确定性来源	降低不确定性的措施
数据准备	DEM 分辨率	提高输入数据分辨率或密度至理想阈值
	气象站点(尤其是雨量站)密度	提高土壤和土地利用类型划分详细程度
	土壤和土地利用数据分辨率和类型划分详细程度	综合考虑理想阈值的空间异质性和研究目标差异、数据获取和运行成本以及各要素数据分辨率的相互匹配
子流域划分和 输入数据尺度转换	子流域划分详细程度	减小子流域提取阈值以提高子流域划分详细程度
	气象站点数据转换到子流域尺度的方法	综合考虑理想阈值的研究目标差异 在降水空间异质性和面积均较小的流域,对气象站点数据进行插值处理
		校准前进行参数本地化和计算方法的改进
模型参数校准	校准过程的异参同效现象	采用自动校准与人工校准相结合和多要素、多站点校准的方法
	评价指标的选取	校准过程中采用多重指标评价模拟效果
	用于校准的观测数据质量和典型性	谨慎选取和检查用于校准的观测数据,并保证校准数据涵盖足够的水文状况

2.1 输入数据分辨率或密度对不确定性的影响

SWAT 模型需要的输入数据包括地形 (DEM)、气象、土壤和土地利用数据。DEM 是 SWAT 模型准确提取流域边界和坡度坡长等地形参数的基础数据,其分辨率对模型的模拟精度有显著影响。地形参数影响流域的汇流时间、汇流滞时以及主河道坡降,最终影响径流、侵蚀、污染物负荷的模拟结果。随着 DEM 数据的分辨率降低,SWAT 模型计算出的研究区坡度会显著低估,使径流、产沙量和氮磷负荷被低估^[44-46],并影响非点源污染关键源区的准确识别^[47],导致其模拟误差出现不同程度的上升。Zhang 等^[46]分析了 DEM 分辨率对 SWAT 模型在香溪河流域的模拟精度的影响,发现在分辨率为 30~1 000 m 的 17 组 DEM 数据中,DEM 分辨率在 30~100 m 时,总磷负荷模拟相对偏差在 10% 以内,而下降到 200,800 m 时,相对偏差分别上升到 130% 和 1 420%。

气象站点数据尤其是雨量站密度,决定了模型能否准确把握区域的降水特征,进而影响模拟结果。有研究发现,径流、侵蚀和营养物质的模拟误差均随着站点密度降低呈指数上升^[48-50],Cho 等^[48]在美国乔治亚州 3 个试验小流域的研究表明,降水站点密度由 0.05 个/km² 降低到 0.003 个/km² 时,磷负荷的均方根偏差变异系数由低于 0.05 上升至 0.30。

土壤和土地利用数据的分辨率和类型划分详细程度决定了模型模拟单元的划分精度和模拟过程中参数的集总程度,是 SWAT 模型模拟中重要的不确定性来源。提高土壤和土地利用数据分辨率及类型划分详细程度,可以通过定义更多的水文响应单元,以更准确提取土壤和管理措施参数,更好地描述其空间分布,从而改善径流、侵蚀和氮负荷的模拟效果。Chaplot^[44]对比分析发现,与 1:25 000 比例尺土壤图相比,采用 1:500 000 分辨率土壤图时 SWAT 模型在美国爱荷华

州中部 Lower Walnut Creek 小流域模拟的氮负荷均值被低估 40%;Luzio 等^[51]在密西西比河 Goodwin Creek 流域的模拟研究发现,应用分辨率较高的土地利用数据可以显著提升产沙量模拟效率。

总体来看,提高输入数据分辨率能显著提高模拟精度,降低模拟不确定性。但是由于模拟单元的平均坡度、河道长度和坡降、子流域个数和面积、平均降水量等参数随输入数据分辨率变化是非线性的,而流域径流、输沙、营养物负荷等的模拟受到这些参数共同影响,某参数变化产生的影响可能由另一参数补偿,导致输入数据精度与模拟效果之间并不是简单的精度越低模拟效果越差的线性关系^[46,52-53],且输入数据的精度在一定阈值范围内时均可得到合理的模拟结果。因此过于追求输入数据精度的提高会增加数据获取、处理和运行成本,但却不一定带来模拟效果的显著提高。

输入数据理想精度阈值因研究区域特征和研究目标而异^[44]。输入数据精度要求与流域的水文地质条件、降雨、土壤、土地利用等要素的空间异质性有关;对空间异质性较强的要素,应提高数据的空间分辨率,以准确反映该要素的空间差异。Chaplot^[54]综合分析了全球 41 个不同流域 SWAT 模型模拟结果,认为流域地形起伏程度增加,土壤数据精度的要求提高;年降水量增加,所需雨量站密度、DEM 和土壤分辨率均需提高。输入数据精度对不同目标变量模拟效果的影响不同^[55-56]:一方面,侵蚀计算以地表径流为基础,污染物负荷的计算在侵蚀计算的基础上进行,由于误差在模拟过程中的传递和放大效应^[52],输入数据分辨率对水文模拟、侵蚀模拟和污染物模拟的影响依次增强;另一方面,由于水文循环各分量之间的灵活转化和相互补偿,流域水文循环系统对输入数据的变化具有较强的阻抗,受到影响程度较低,而侵蚀和污染物负荷模拟补偿作用较弱,受影响程度较

高^[57]。Zhang 等^[46]研究发现, SWAT 模型在香溪河流域径流模拟的 DEM 分辨率上限阈值为 200 m, 氮负荷 150 m, 侵蚀模拟和磷负荷最高, 为 100 m。

另外, 各要素数据的分辨率应相互匹配, 单独提高其中某一种输入数据的分辨率对于整体模拟效果的提高会受到其他数据的限制^[54,58]。因此, 在选择输入数据的精度时应综合考虑数据获取成本, 根据研究区域特征、研究目标及可接受的最大误差来具体分析。

2.2 子流域划分和输入数据尺度转换对不确定性的影响

SWAT 模型需要将地形、土壤、土地利用等栅格尺度的空间数据和气象站点数据转化到模拟单元尺度后进行模拟计算, 尺度转换过程会导致一定的模拟误差。

对于栅格尺度空间数据, SWAT 模型首先根据给定的子流域提取阈值(最小集水面积)和 DEM 数据将研究流域划分为子流域, 再将每个子流域依据土地利用类型、土壤类型和坡度等指标进一步划分为水文响应单元, 即 SWAT 模型的基础模拟单元, 然后通过集总简化为每个水文响应单元获取坡度、土壤、土地利用等空间数据参数。因此, 子流域提取阈值与输入数据精度共同决定模拟单元划分的详细程度, 而模拟单元划分的详细程度决定了空间数据的集总程度: 模拟单元划分越细致, 其内部均质性越大, 数据越准确, 从而降低模拟结果的不确定性。Chiang 等^[59]对密西西比河上游 Kaskaskia 流域的模拟发现, 降低子流域的划分数量, 会使流域输沙量被高估, 而氮负荷被低估。但是单元划分过细会显著增加计算时间, 合理的选择是, 在保证足够模拟精度时, 尽量减少子流域的划分数量。采用流域面积的 2%~5% 作为子流域的提取阈值, 即将研究区域划分为 50~20 个子流域, 模拟结果的不确定性较低, 超过此阈值后模拟误差增大^[60-61]。在美国爱荷华州, Jha 等^[62]分析了在 4 个不同面积流域应用 SWAT 模型时子流域划分阈值的影响, 结果表明在子流域划分阈值 $\leq 5\%$ 时, SWAT 模型能够合理模拟输沙、硝态氮和无机磷负荷, 但超出该阈值后, 三者模拟效率均下降; 在黄土高原杏子河流域, 邱临静等^[45]发现在子流域提取阈值超过 100 km² (6.7%) 时, 模型会低估产沙量。当然, 上述阈值只是一个经验参数, 不能作为普适性标准, 需要综合考虑研究区域 DEM 的分辨率^[47]、流域特征^[54]和研究目标等因素。根据不同的模拟目标, 子流域划分的细致程度可按照径流、输沙、污染物负荷、污染源区空间位置识别的顺序逐渐增加^[54,63]。

对于气象站点数据, SWAT 模型假设同一个子流域内气象数据的空间分布是均质的, 采用重心法将距离子流域重心最近的气象站点数据分配到该子流域, 并应用

于该子流域所有水文响应单元的模拟计算。该尺度转换会导致模拟误差, 其误差大小受流域面积、子流域划分水平及站点数据本身表征能力的影响^[48,64-65]。在子流域划分水平过低或站点密度过低时, 可通过插值来改进重心法不能准确反映输入数据空间异质性的问题。有研究发现, 应用泰森多边形法、反距离权重法、协同克立格法等插值方法对站点数据进行插值, 进而应用各子流域的面平均雨量进行模拟计算, 能够提高 SWAT 模型的径流模拟精度^[66]。但需注意的是, 在降水空间分布特征复杂或面积较大的流域, 插值本身引入的不确定性过大^[55], 仅可考虑通过提高子流域划分水平和站点密度来降低重心法导致的模拟误差, 而不建议使用插值计算代替重心法。

2.3 模型参数校准对不确定性的影响

SWAT 模型参数众多, 获取费时费力且部分数据难以准确获取, 因此模型参数校准是 SWAT 模型应用过程中不可缺少的步骤^[10]。模型参数校准过程产生的不确定性, 主要取决于 3 个方面: 校准过程的异参同效现象、评价指标的选取、用于校准的观测数据质量和典型性。

异参同效现象是指模型校准过程中不同参数集合可能得到非常相似的模拟效果的现象。可以从以下几方面对异参同效现象进行限制: 首先, 校准前进行参数本地化, 并改进不适用于该研究区域的计算方法。参数本地化可充分利用模型使用者知识经验和研究区域实际情况对参数进行赋值或限制参数校准范围^[67-69], 根据研究区域特征改进部分计算方法可防止校准时使用不合理的参数代偿不合理的计算方法^[70]。其次, 自动校准与人工校准相结合。自动校准可大幅提高校准效率, 但自动校准完全代替人工校准则会显著增加得到不合理参数集的风险。使用自动校准与人工校准相结合的方法, 应用本地知识对自动校准进行限制和调整, 可在保障高效的同时降低不确定性^[67]。SWAT-CUP 软件作为自动校准与人工校准相结合的工具, 在 SWAT 模型相关研究中得到广泛应用^[71]。再次, 进行多要素校准。SWAT 模型将流域作为一个系统进行模拟, 系统内部的物理、生态过程紧密联系、相互制约, 对多个要素进行校准能够间接验证模型对整体流域系统模拟的合理性^[2,58,72]。另外, 应用多站点进行校准。在研究目标变量的空间分布时极易发生异参同效现象。如在侵蚀模拟中, 被高估的土壤侵蚀量可能由于同样被高估的河道沉积, 而导致在流域出口处的输沙量没有明显差别, 因此仅仅校准流域出口输沙量并不能保证流域内部的水文和侵蚀过程得到准确的模拟^[58]。多站点校准的效果与流域空间异质性有关, 在空间异质性强

的流域效果较好^[73],在空间分布较均匀的流域,多站点校准与单站点校准相比没有显著优势^[74]。并且多站点校准的效果因研究目标而异,当研究目标变量的空间分布时效果较好,而对流域出口径流输沙量的模拟影响较小^[75]。

模型校准过程中,参数的调整是基于模拟效果评价指标的变化趋势进行的,并在评价指标达到标准时结束校准,评价指标能否准确反映模拟值与观测值的契合程度是模型校准的关键。不同的评价指标侧重于对模拟效率的不同方面进行评价,如决定系数(R^2)侧重于评估模拟结果的相关性,却难以识别系统误差,当模型系统地高估或低估目标变量时, R^2 不能正确评价模拟效果;Nash-Sutcliffe 系数(NSE)侧重于评估观测值与模拟值相对于 1:1 的符合程度,但是采用平方差进行计算,对峰值非常敏感却容易忽略低值的模拟误差;百分比偏差(PBIAS)用于评估模型的长时期平均值模拟效率,但不针对短期波动趋势进行评估。应用单一评价指标校准的模型可能仍然存在较大的模拟误差^[76-78]。Krause 等^[79]发现仅基于 R^2 对德国 Wilde Gera 流域的日径流模拟进行校准,校准后 R^2 从 0.23 提高到 0.93,但此校准后的模型系统地低估了观测值,其 NSE 仅为 -1.66。因此,评价指标的选取应根据研究目标和各评价指标的具体含义灵活选择多重指标,如应用最为广泛的 R^2 、NSE 和 PBIAS 的组合^[10]。

用于校准的观测数据质量是校准的基础,观测误差较大的数据必然会降低校准和模拟的准确性,因此,应谨慎选取数据来源并对观测数据进行细致检查。数据的典型性是指校准数据对研究区域实际状况的反映能力。在划分校准时段和验证时段时,应使校准期和验证期包含相似的水文状况,并使校准数据涵盖足够的水文状况以提高数据的典型性^[76]。

3 降低 SWAT 模型不确定性的措施

针对上述 SWAT 模型不确定性来源,本文以 SWAT 模型在黄土高原的应用为例,总结提出减少不确定性的措施。基于黄土高原坡度陡峭、地形和土地利用破碎的特征,应尽可能获取高分辨率 DEM 以准确提取坡度坡长等地形参数,并提高土地利用数据的分辨率和土地利用类型划分的细致程度,以提高模拟单元内部均质性。同时,由于黄土高原降雨集中、强度大、空间分布不均匀,应尽量增加气象站点密度,尤其是降雨站点密度,并以流域外站点作为补充,而插值处理必须进行谨慎验证。在此基础上,应综合考虑研究目标和模拟运算时间成本,提高子流域划分精度至理想阈值范围,以降低空间数据的集总程度。另外,在黄土高原应用 SWAT 模型时必须根据研究区的试验或相关文献对模型的关键参数进行本地化。

径流曲线数(CN)是 SWAT 模型计算地表径流的关键参数,在同等级降雨条件下,地表径流量随着 CN 的增大而增大。CN 的取值主要由土地覆被类型和土壤水分条件决定,可根据研究区相应土地覆被和土壤水分条件下的径流小区观测数据为其赋值;在观测数据缺乏时,则应根据土地覆被类型、耕作管理措施、禁牧措施以及水分条件等,在 SWAT 模型使用手册提供的表格中查找典型值^[80]。土壤侵蚀植被覆盖因子(USLE_C)是指一定植被覆盖条件下的土壤流失量与连续休耕地的土壤流失量之比,USLE_C 值越大表明相应植被覆盖条件下土壤侵蚀越严重。SWAT 模型根据每日植被盖度变化和该土地利用类型的最小 USLE_C 值自动调整每日 USLE_C 值。模型使用者可根据研究区域内侵蚀试验小区的观测数据,以植被盖度最高时土壤流失量与休耕地土壤流失量的比例,为不同土地利用的最小 USLE_C 赋值;在观测和文献数据缺乏时,则可根据植被类型选用 SWAT 模型数据库的默认值。SWAT 模型的部分计算方法也应根据黄土高原的特征进行本地化改进,如黄土高原坡度陡峭,应用 SWAT 模型时可应用独立的坡长计算工具计算侵蚀模拟方程的地形因子参数,替换模型基于经验公式趋势外推得到的默认值;根据黄土高原高含沙流的特征对 SWAT 模型河道内泥沙沉积和侵蚀的算法进行改进;增加对淤地坝建设等黄土高原上常见的水土保持措施的模拟等。由于模型参数和计算方法本地化专业性强,需要了解模型的基本结构和相关的基础知识,是 SWAT 模型应用的难点。对初次使用者,建议通过专业培训或文献阅读,理解模型的结构、各模块之间的逻辑关系和关键方程,在此基础上寻求专业人员的帮助,对参数和计算方法进行修订。最后,黄土高原上流域的水文循环过程通常具有较强的时间和空间变异性,在模拟水文要素、土壤侵蚀等的空间分布时,建议使用 SWAT-CUP 等校准工具,采用多重评价指标、自动校准与人工校准相结合以及多要素、多站点校准的方式,以减少模型参数校准导致的不确定。

4 结论

SWAT 模型在国内外流域水文循环、土壤侵蚀、污染物负荷、气候变化与土地利用变化的影响等研究中得到广泛应用。但是,模型输入数据精度不足以准确反映其空间差异时会使模拟结果产生较大误差。在子流域划分粗略时,输入数据向模拟单元尺度的转换可能会导致过高的参数集总程度,使模拟精度降低。另外,模型参数校准过程中观测数据和评价指标的不合理选择,以及异参同效现象等 SWAT 模型应用中的常见问题,也会导致模型模拟结果具有较高的

不确定性。在模型应用时,理解模型的基本原理和结构,把握模型应用主要步骤中可能的不确定性来源并采取相应的措施提高模拟精度,是提高 SWAT 模型模拟结果可信度的必要途径。

参考文献:

- [1] 江净超,朱阿兴,秦承志,等. 分布式水文模型软件系统研究综述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1090-1100.
- [2] Krysanova V, White M. Advances in water resources assessment with SWAT-an overview [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(5): 771-783.
- [3] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. Soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions [J]. The Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [4] Knisel W G. CREAM, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [R]. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, USDA Conservation Research Report, 1980.
- [5] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in rural basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(6): 970-986.
- [6] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment routing model for large basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [7] Srinivasan R, Arnold J G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1994, 30(3): 453-462.
- [8] Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold A J. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1423-1431.
- [9] Gassman P W, Sadeghi A M, Srinivasan R. Applications of the SWAT model special section: Overview and insights [J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(1): 1-8.
- [10] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT : Model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1549-1559.
- [11] Murty P S, Pandey A, Suryavanshi S. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken basin of Central India [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(13): 4119-4129.
- [12] Sintondji L O, Zokpodo B, Ahouansou D M, et al. Modelling the water balance of Ouémé catchment at the Savè outlet in Benin: Contribution to the sustainable water resource management [J]. International Journal of Agriscience, 2014, 4(1): 74-88.
- [13] Rodrigues D B, Gupta H V, Mendiondo E M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security [J]. Water Resources Research, 2014, 50(9): 7187-7205.
- [14] Zhao A, Zhu X, Liu X, et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China [J]. Catena, 2016, 137(2): 318-327.
- [15] Mukundan R, Pradhanang S M, Schneiderman E M, et al. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA [J]. Geomorphology, 2013, 183(2): 110-119.
- [16] Gessesse B, Bewket W, Bräuning A. Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia [J]. Land Degradation & Development, 2014, 26(7): 711-724.
- [17] Kumar S, Mishra A. Critical Erosion area identification based on hydrological response unit level for effective sedimentation control in a river basin [J]. Water Resources Management, 2015, 29(6): 1-17.
- [18] Liu R, Xu F, Zhang P, et al. Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533(2): 379-388.
- [19] Wardropper C B, Chang C, Rissman A R. Fragmented water quality governance: Constraints to spatial targeting for nutrient reduction in a Midwestern USA watershed [J]. Landscape & Urban Planning, 2015, 137(5): 64-75.
- [20] Gungor K, Karakaya N, Evrendilek F, et al. Spatio-temporal modeling of watershed nutrient transport dynamics: Implications for eutrophication abatement [J]. Ecological Informatics, 2016, 34(7): 52-69.
- [21] Shen Z, Zhong Y, Huang Q, et al. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones [J]. Water Research, 2015, 68(1): 563-571.
- [22] Karamouz M, Taheriyoun M, Baghvand A, et al. Optimization of watershed control strategies for reservoir eutrophication management [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2010, 136(12): 847-861.
- [23] Bosch N S, Evans M A, Scavia D, et al. Interacting effects of climate change and agricultural BMPs on nutrient runoff entering Lake Erie [J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, 40(3): 581-589.
- [24] Cousino L K, Becker R H, Zmijewski K A. Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed [J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2015, 4(B): 762-775.

- [25] Gevaert V, Griensven A V, Holvoet K, et al. SWAT developments and recommendations for modelling agricultural pesticide mitigation measures in river basins [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(5): 1075-1089.
- [26] Jayakody P, Parajuli P B, Brooks J P. Evaluating spatial and temporal variability of fecal coliform bacteria loads at the Pelahatchie Watershed in Mississippi [J]. *Human & Ecological Risk Assessment*, 2014, 20(4): 1023-1041.
- [27] Cho K H, Pachepsky Y A, Oliver D M, et al. Modeling fate and transport of fecally-derived microorganisms at the watershed scale: State of the science and future opportunities [J]. *Water Research*, 2016, 100(9): 38-56.
- [28] Zuo D, Xu Z, Yao W, et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 544(2): 238-250.
- [29] Zhang S, Liu Y, Wang T. How land use change contributes to reducing soil erosion in the Jialing River Basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133(1): 65-73.
- [30] Aich V, Liersch S, Vetter T, et al. Climate or land use? Attribution of changes in river flooding in the Sahel Zone [J]. *Water*, 2015, 7(6): 2796-2820.
- [31] Molina-Navarro E, Trolle D, Martínez-Pérez S, et al. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509(4): 354-366.
- [32] Rahman K, da Silva A G, Tejeda E M, et al. An independent and combined effect analysis of land use and climate change in the upper Rhone River watershed, Switzerland [J]. *Applied Geography*, 2015, 63(9): 264-272.
- [33] Serpa D, Nunes J P, Santos J, et al. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 538(12): 64-77.
- [34] 李硕. GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2002.
- [35] 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.
- [36] Tian F, Yi H L, Fu B J, et al. Effects of ecological engineering on water balance under two different vegetation scenarios in the Qilian Mountain, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 2016, 5(C): 324-335.
- [37] Wei G, Rao Z, Dong J, et al. Late Quaternary climatic influences on megalake Jilantai-Hetao, North China, inferred from a water balance model [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2016, 55(3): 223-240.
- [38] Ouyang W, Hao F, Skidmore A K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River [J]. *Science of The Total Environment*, 2010, 409(2): 396-403.
- [39] Liu Y, Yang W, Yu Z, et al. Estimating sediment yield from upland and channel erosion at a watershed scale using SWAT [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(5): 1399-1412.
- [40] Nielsen A, Trolle D, Me W, et al. Assessing ways to combat eutrophication in a Chinese drinking water reservoir using SWAT [J]. *Marine & Freshwater Research*, 2013, 64(5): 475-492.
- [41] Chen Y, Song X, Zhang Z. Simulating the impact of flooding events on non-point source pollution and the effects of filter strips in an intensive agricultural watershed in China [J]. *Limnology*, 2014, 16(2): 91-101.
- [42] 余文君, 南卓铜, 李硕, 等. 黑河山区流域平均坡长的计算与径流模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1): 41-48.
- [43] 孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉, 等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 528-539.
- [44] 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(1/4): 207-222.
- [45] 邱临静, 郑粉莉, Yin R. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(12): 3754-3763.
- [46] Zhang P, Liu R, Bao Y, et al. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed [J]. *Water Research*, 2014, 53(8): 132-144.
- [47] Xu F, Dong G, Wang Q, et al. Impacts of DEM uncertainties on critical source areas identification for non-point source pollution control based on SWAT model [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540(9): 355-367.
- [48] Cho J, Bosch D, Lowrance R, et al. Effect of spatial distribution of rainfall on temporal and spatial uncertainty of SWAT output [J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(5): 277-281.
- [49] Moriasi D N, Starks P J. Effects of the resolution of soil dataset and precipitation dataset on SWAT 2005 streamflow calibration parameters and simulation accuracy [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2010, 65(2): 1394-1403.
- [50] Chaplot V, Saleh A, Jaynes D B. Effect of the accuracy

- cy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ loads at the watershed level [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1/4): 223-234.
- [51] Luzio M D, Arnold J G, Srinivasan R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 629-650.
- [52] Shen Z Y, Hong Q, Yu H. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1/3): 195-205.
- [53] Tan M L, Ficklin D L, Dixon B, et al. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow [J]. *Applied Geography*, 2015, 63(9): 357-368.
- [54] Chaplot V. Impact of spatial input data resolution on hydrological and erosion modeling: Recommendations from a global assessment [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2014, 67/69(2): 23-35.
- [55] Shen Z, Chen L, Liao Q, et al. Impact of spatial rainfall variability on hydrology and nonpoint source pollution modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 472/473(12): 205-215.
- [56] Lin S, Jing C, Coles N A, et al. Evaluating DEM source and resolution uncertainties in the Soil and Water Assessment Tool [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2013, 27(1): 209-221.
- [57] Bieger K, Hörmann G, Fohrer N. The impact of land use change in the Xiangxi Catchment (China) on water balance and sediment transport [J]. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(3): 485-498.
- [58] Vigiak O, Malagó A, Bouraoui F, et al. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538(12): 855-875.
- [59] Chiang L C, Yuan Y. The NHDPlus dataset, watershed subdivision and SWAT model performance [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(10): 1690-1708.
- [60] 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.
- [61] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M, et al. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(2): 513-528.
- [62] 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.
- [63] Wang G, Chen L, Huang Q, et al. The influence of watershed subdivision level on model assessment and identification of non-point source priority management areas [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 87(3): 110-119.
- [64] Ilyas M, Shreedhar M, Stefan U, et al. Assessing the impact of areal precipitation input on streamflow simulations using the SWAT model [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 47(1): 179-195.
- [65] Fu S, Sonnenborg T O, Jensen K H, et al. Impact of precipitation spatial resolution on the hydrological response of an integrated distributed water resources model [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1): 25-36.
- [66] Tuppad P, Douglas-Mankin K R, Koelliker J K, et al. SWAT discharge response to spatial rainfall variability in a Kansas watershed [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(1): 65-74.
- [67] Hu X, McIsaac G F, David M B, et al. Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois watershed using SWAT [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(4): 996-1005.
- [68] Li C, Qi J, Feng Z, et al. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese Loess Plateau [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2010, 4(3): 296-310.
- [69] Ng T L, Eheart J W, Cai X, et al. Modeling miscanthus in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to simulate its water quality effects as a bioenergy crop [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(18): 7138-7144.
- [70] 李润奎, 朱阿兴, 陈腊娇, 等. SCS-CN 模型中土壤参数的作用机制研究 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(10): 1778-1787.
- [71] Abbaspour K C, Vejdani M, Haghighat S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [C]//Oxley L, Kulasiri D. *Congress on Modeling and Simulation (MODSIM'07)*. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2007: 1603-1609.
- [72] Nair S S, King K W, Witter J D, et al. Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, 47(6): 1285-1297.
- [73] Niraula R, Norman L M, Meixner T, et al. Multi-gauge calibration for modeling the semi-arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico border area using SWAT [J]. *Air Soil & Water Research*, 2012, 5(5): 41-57.