

基于SWAT模型的流域水文过程模拟与水资源评估研究

张伟

山东省日照市奎山街道办事处 山东 日照 276800

摘要: 随着全球气候变化和人类活动强度的不断加剧,流域水文过程日益复杂,水资源短缺、洪涝灾害、水质恶化等问题频发,对区域可持续发展构成严峻挑战。科学、精准地模拟流域水文过程并开展水资源评估,已成为水资源管理与生态保护的关键基础。本文以分布式水文模型SWAT为核心工具,系统探讨其在流域水文过程模拟与水资源评估中的理论基础、技术流程、应用优势及实践挑战。首先,综述SWAT模型的基本原理、结构框架及其在国内外的研究进展;其次,详细阐述基于SWAT模型开展流域水文模拟与水资源评估的技术路线,包括数据准备、模型构建、参数率定与验证、情景设置等关键环节;最后,针对模型在数据依赖性、参数不确定性、尺度效应及耦合集成等方面的局限性,提出未来研究方向与优化路径。研究表明,SWAT模型凭借其物理机制明确、空间分辨率高、功能模块丰富等优势,在流域尺度水文模拟与水资源综合评估中具有广阔应用前景,但需结合多源数据融合、不确定性分析及与其他模型耦合等手段,进一步提升其模拟精度与决策支撑能力。

关键词: SWAT模型;水文过程模拟;水资源评估;分布式水文模型;参数率定;情景分析

引言

水是生命、生产、生态之基,流域水文过程决定水资源分布与可利用性。全球变暖下,极端气候与人类活动叠加,使流域水文循环改变,水资源供需矛盾突出,生态系统退化。准确刻画流域水文响应、评估水资源承载力,对制定适应性管理策略、保障水与生态安全意义重大。传统集总式水文模型应用广,但难反映流域空间异质性,无法有效模拟复杂过程。分布式水文模型将流域划分成均质子单元,能更真实描述水文要素空间分布与动态变化。其中,美国农业部开发的SWAT模型开源免费、结构灵活、功能全面,适用于长期、大尺度流域的水文与水质模拟,成为国际水文学界重要工具。自20世纪90年代问世,SWAT模型在世界数百个流域成功应用,涵盖径流预测、面源污染估算等多个方向。不过,应用中面临输入数据质量、参数敏感性等挑战,影响模拟结果可靠性与适用性。系统梳理其应用方法、成效与不足,对推动本土化改进、提升水资源管理水平有重要价值。本文围绕“基于SWAT模型的流域水文过程模拟与水资源评估”,从模型原理、流程到问题挑战展开系统性探讨,为相关研究与实践提供参考。

1 SWAT模型基本原理与结构

1.1 模型概述

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是一个基于物理过程的半分布式、连续时间尺度的流域水文模型。其设计初衷是评估土地管理措施对流域水文、泥沙、营养盐及农药输移的影响,现已扩展至水资源综合评估、

气候变化响应分析等领域。模型以日为时间步长,可模拟数十年甚至上百年的水文过程,适用于面积从数百至数十万平方公里的流域^[1]。该模型强调对自然过程的物理机制描述,同时兼顾计算效率与实用性,使其在科研与管理实践中兼具灵活性与可操作性。

1.2 模型结构与水文过程

SWAT模型将流域划分为多个子流域 (Sub-basin), 每个子流域进一步划分为若干水文响应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU)。HRU是模型的基本计算单元,由具有相同土地利用、土壤类型和坡度等级的区域组成,从而有效表征流域的空间异质性。

模型的核心水文过程遵循水量平衡方程:

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

其中, SW_t 为第 t 天土壤含水量, SW_0 为初始土壤含水量, R_{day} 为日降雨量, Q_{surf} 为地表径流, E_a 为实际蒸发, W_{seep} 为土壤渗漏量, Q_{gw} 为地下水流。

具体水文过程模块包括: (1) 气象模块: 输入降水、气温、风速、湿度、太阳辐射等气象数据, 驱动整个水文循环。(2) 地表径流模块: 采用SCS曲线法 (CN法) 计算地表径流量。(3) 蒸散发模块: 支持Penman-Monteith、Hargreaves等多种潜在蒸散发计算方法, 并结合土壤水分限制计算实际蒸散发。(4) 土壤水运动模块: 采用蓄满产流概念, 模拟土壤剖面水分动态, 包括入渗、再分布、侧向流等。(5) 地下水模块: 包含浅层与深层含水层, 模拟基流补给与排泄。(6) 河

道汇流模块：采用Muskingum-Cunge方法或动力波方法模拟子流域出口至流域出口的河道汇流过程。（7）水库/湿地模块：可模拟人工水库、自然湖泊及湿地的调蓄作用。此外，SWAT还集成了作物生长、养分循环、泥沙输移、农药迁移等模块，使其成为多功能综合评估平台。

2 基于 SWAT 的流域水文模拟与水资源评估技术流程

2.1 数据准备

高质量、多源数据是SWAT模型成功应用的前提。模型对输入数据的完整性与代表性有较高要求，主要包括地形、土地利用、土壤、气象及水文观测五类数据。地形数据通常采用30米或更高分辨率的数字高程模型（DEM），用于自动提取河网结构与流域边界；土地利用/覆被数据需与SWAT内置的土地利用分类体系匹配，常用来源包括GlobeLand30、MODIS产品或地方遥感解译成果；土壤数据不仅需要空间分布图，还需配套详细的物理属性参数，如田间持水量、饱和导水率、有机质含量等，常来源于HWSD全球数据库或本地土壤普查资料；气象数据至少应包含日降水与日最高/最低气温，理想情况下还需风速、相对湿度和太阳辐射，可来自地面气象站点或CMFD、ERA5-Land等再分析数据集；水文观测数据主要用于模型率定与验证，要求具有较长序列、良好连续性 & 代表性，通常选取流域出口断面的日径流量记录^[2]。值得注意的是，各类数据的空间配准、时间一致性 & 单位统一是建模前不可忽视的基础工作。

2.2 模型构建

模型构建是将现实流域抽象为SWAT可识别结构的过程。首先，基于DEM生成流向与汇流累积量栅格，设定最小集水面积阈值（如5–10 km²）自动划分子流域，一般建议子流域数量控制在10至50个之间，以平衡空间异质性表达与计算效率。随后，在每个子流域内，根据土地利用、土壤类型和坡度等级（如0–2%、2–6%、> 6%）的组合生成水文响应单元（HRU），并可设置最小面积比例（如5%）剔除次要组合以简化结构。接着，将外部获取的土地利用与土壤属性数据映射至SWAT内置数据库，必要时需对本地特殊地类（如茶园、竹林）或土壤类型进行参数本地化调整。最后，将气象站点数据分配至各子流域，可采用最近邻法或空间插值法（如反距离权重）进行气象驱动场构建。整个建模过程需反复检查数据逻辑一致性，确保模型输入的科学性与合理性。

2.3 参数率定与验证

参数率定是提升模型模拟精度的关键环节。SWAT模型包含百余个参数，但仅有少数对输出结果高度敏

感。因此，通常先通过敏感性分析（如Morris筛选法或Sobol全局敏感性分析）识别关键参数，如CN2（径流曲线数）、SOL_AWC（土壤有效含水量）、GW_DELAY（地下水延迟时间）等。随后，借助自动率定工具（如SWAT-CUP平台中的SUFI-2、GLUE或PSO算法）对敏感参数进行优化，目标函数常选用Nash-Sutcliffe效率系数（NSE）、决定系数（R²）和百分比偏差（PBIAS）等指标。率定期通常选择数据质量较好、人类干扰较小的时段，而验证期则使用独立时间段的数据检验模型的泛化能力^[3]。一般认为，当率定期与验证期的NSE大于0.5、R²接近1、PBIAS绝对值小于15%（针对径流）时，模型可视为具有满意或良好的模拟效果。值得注意的是，参数率定并非追求“最优拟合”，而应在物理合理性和统计性能之间取得平衡，避免过度拟合导致模型外推能力下降。

2.4 水资源评估与情景分析

在模型通过验证后，即可开展多维度的水资源评估与情景模拟。首先，可基于长期模拟结果统计多年平均径流量、基流占比、季节分配特征等，评估流域水资源总量及其时空分布规律。其次，通过设定不同的土地利用/覆被变化（LUCC）情景（如退耕还林、城市扩张、农业结构调整），对比分析其对产汇流过程、洪水频率及枯水期流量的影响，为国土空间规划提供依据。再次，可耦合全球气候模式（如CMIP6）输出的未来气候情景（如SSP2-4.5、SSP5-8.5），驱动SWAT模型预测未来径流变化趋势，识别潜在的水资源风险（如干旱加剧或洪峰增大）。最后，结合社会经济用水需求数据，可进一步开展水资源供需平衡分析，评估区域水资源承载力，并提出适应性管理对策。此类情景分析不仅揭示了自然与人为因素对水文系统的复合影响，也为制定韧性水资源管理策略提供了科学支撑。

3 模型应用中的挑战与局限

尽管SWAT模型在理论与实践展现出显著优势，其应用仍面临诸多挑战。首先，模型对输入数据的质量与完整性高度依赖，尤其在数据匮乏地区，土壤属性缺失、气象站点稀疏或土地利用分类粗糙等问题会显著降低模拟精度。其次，参数不确定性问题不容忽视。部分关键参数缺乏明确的物理定义，率定过程易受局部最优解干扰，且存在“等效性”现象——即不同参数组合可能产生相似的输出结果，这给模型解释与外推带来困难。第三，尺度效应限制了模型的适用边界。虽然SWAT通过HRU机制体现空间异质性，但HRU本身仍是均质假设下的抽象单元，难以捕捉微观水文过程；而在大流域应用中，空间代表性误差可能随尺度放大而累积。第

四,模型对某些复杂水文过程的刻画仍显简化,例如对冻融作用、喀斯特地区快速地下水流、城市管网排水系统等特殊机制缺乏有效模块支持。最后,长时间序列、高分辨率模拟往往计算耗时较长,限制了其在实时洪水预报或高频决策支持场景中的应用。这些局限性提示研究者在应用SWAT时需保持审慎态度,充分认识模型的适用条件与边界。

4 未来研究方向与优化路径

为克服现有局限并拓展SWAT模型的应用深度,未来研究应从多维度推进模型优化与集成。首先,应加强多源数据融合,充分利用遥感(如Sentinel系列、GRACE重力卫星)、物联网水文传感器、社交媒体众包信息等新型数据源,提升输入数据的时空分辨率与动态更新能力。其次,需系统开展不确定性量化研究,推广贝叶斯推断、集合模拟(ensemble modeling)等方法,全面评估参数、输入数据及模型结构不确定性对输出结果的影响,增强模拟结果的可信度^[4]。第三,推动模型耦合集成是重要发展方向,例如将SWAT与城市雨洪模型(如SWMM)耦合以精细模拟城乡交错带水文过程,或与地下水模型(如MODFLOW)联合构建地表-地下水一体化系统,还可嵌入社会经济模块,构建“自然-社会”复合系统模型,实现水-粮食-能源-生态协同评估。第四,探索机器学习与物理模型的融合路径,利用LSTM、随机森林等算法辅助参数自动率定、残差校正或替代部分经验性模块,在保证物理一致性的前提下提升计算效率。最后,针对中国特殊地理环境(如黄土高原的强侵蚀区、西南喀斯特地区的岩溶水文系统、青藏高原的寒区水文

过程),亟需开展本地化模块开发与参数体系构建,增强模型对区域水文特征的刻画能力。通过上述路径,SWAT模型有望从科研工具逐步转型为支撑国家水治理现代化的业务化平台。

5 结语

SWAT模型作为国际主流的分布式水文模型,在流域水文过程模拟与水资源综合评估中展现出强大的功能与广泛的应用潜力。通过科学的数据准备、严谨的参数率定与多情景分析,SWAT能够有效揭示气候变化与人类活动对流域水循环的影响机制,为水资源规划、生态保护与灾害防控提供定量决策支持。然而,模型应用仍受限于数据质量、参数不确定性及过程简化等问题。未来研究应聚焦于多源数据融合、不确定性分析、模型耦合与本地化改进,推动SWAT模型从“科研工具”向“业务化平台”转型,更好地服务于国家水安全保障与生态文明建设战略。

参考文献

- [1]李志军,肖义,汪党献.基于SWAT模型的干旱区内陆河流域径流模拟分析[J].水利规划与设计,2026,(01):52-56.
- [2]朱青云,邹进.基于SWAT的盘龙江流域水文-水质耦合模型研究[J].中国水运,2025,(18):46-48+51.
- [3]黎雪,林焜璇,李兴华,等.基于SWAT模型的东江湖流域面源污染源识别与削减措施研究[J].长江流域资源与环境,2025,34(08):1855-1866.
- [4]赵汉文,曾海涛,马金珠.基于SWAT模型的葫芦河流域气候变化对水沙的影响分析[J].水电能源科学,2025,43(07):1-6.