

基于 SWAT 模型的流域径流模拟： 气候变化条件下的挑战与机遇

田恬

吉林工业职业技术学院制药工程分院

DOI:10.12238/jpm.v5i12.7527

[摘要] 在全球气候变化的影响下，流域水文循环过程正发生显著变化，对水资源管理与防洪减灾构成挑战。SWAT 模型作为分布式水文模型，在流域径流模拟中展现出强大能力，但其在气候变化条件下的应用也面临数据获取、模型参数确定及人类活动影响等多重挑战与机遇。本文探讨了基于 SWAT 模型的流域径流模拟在气候变化条件下的挑战与机遇。SWAT 模型作为一种分布式流域水文模型，在流域径流模拟中具有广泛应用。然而，在气候变化背景下，流域径流模拟面临着气候变化的复杂性与不确定性、数据获取与处理的难度、模型参数确定与验证的复杂性以及人类活动对流域水文过程的影响等多重挑战。同时，流域径流模拟也孕育着诸多机遇，如 SWAT 模型在精细化模拟方面的优势、气候变化研究为流域管理提供的新视角、技术进步对数据获取与处理的支持以及跨学科合作带来的新机遇。通过深入分析这些挑战与机遇，本文旨在为流域水资源管理和环境保护提供更加科学、全面和创新的解决方案。

[关键词] SWAT 模型；流域径流模拟；气候变化；数据获取与处理；跨学科合作

Watershed Runoff simulation based on the SWAT model: Challenges and Opportunities in climate change

Tian Tian

Jilin Industrial Vocational and Technical College, Pharmaceutical Engineering Branch

[Abstract] Under the influence of global climate change, the hydrological cycle process of the river basin is undergoing significant changes, which poses challenges to water resources management and flood control and disaster reduction. As a distributed hydrological model, SWAT model has shown strong ability in watershed runoff simulation, but its application in the condition of climate change also faces multiple challenges and opportunities, such as data acquisition, model parameter determination and the impact of human activities. This paper explores the challenges and opportunities of watershed runoff simulation based on SWAT model under climate change conditions. As a distributed watershed hydrological model, the SWAT model is widely used in watershed runoff simulation. However, in the context of climate change, watershed runoff simulation faces multiple challenges, such as the complexity and uncertainty of climate change, the difficulty of data acquisition and processing, the complexity of model parameter determination and validation, and the impact of human activities on the hydrological process of the watershed. At the same time, watershed runoff simulation also breeds many opportunities, such as the advantages of SWAT model in fine simulation, the new perspective of climate change research for watershed management, the support of technological progress for data acquisition and processing, and the new opportunities brought by interdisciplinary cooperation. Through an in-depth analysis of these challenges and opportunities, this paper aims to provide more scientific, comprehensive and innovative solutions for watershed water resources management and environmental protection.

[Key words] SWAT model; watershed runoff simulation; climate change; data acquisition and processing; interdisciplinary cooperation

引言

在全球气候变化的大背景下，流域水文过程正经历着前所未有的变化，这对流域水资源管理和环境保护构成了严峻挑

战。为了有效应对这些挑战，基于 SWAT 模型的流域径流模拟成为一种重要的研究手段。SWAT 模型作为一种分布式流域水文模型，凭借其强大的模拟能力和广泛的适用性，在国内外流域

径流模拟中得到了广泛应用。然而，流域径流模拟并非易事，尤其是在气候变化条件下。气候变化的复杂性与不确定性给流域径流模拟带来了巨大挑战。降水、温度等气候要素的时空分布变化，以及极端天气事件的频发，都增加了模拟的难度和不确定性^[1]。此外，数据获取与处理的难度、模型参数确定与验证的复杂性以及人类活动对流域水文过程的影响，也是流域径流模拟中不可忽视的问题。但与此同时，流域径流模拟也面临着诸多机遇。SWAT 模型在精细化模拟方面的优势，使得我们能够更加深入地了解流域水文过程的变化规律。气候变化研究为流域管理提供了新的视角，通过预测未来气候变化情景下的流域水文响应，可以制定更为科学的适应性管理策略。技术进步对数据获取与处理的支持，使得我们能够获取更加准确和全面的数据，提高模拟的准确性和可靠性。跨学科合作带来的新机遇，则促进了不同学科之间的知识交流和融合，为流域径流模拟提供了更为全面和创新的解决方案^[2]。综上所述，基于 SWAT 模型的流域径流模拟在气候变化条件下既面临挑战也蕴含机遇。

1 SWAT 模型简介及其应用

1.1 SWAT 模型的基本原理与结构

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美国农业部 (USDA) 的农业研究中心 Jeff Arnold 博士于 1994 年开发的。它是一个基于 GIS 的分布式流域水文模型，主要用于模拟流域内水文循环过程、土壤侵蚀、化学物质迁移转化等。SWAT 模型的基本原理遵循水量平衡方程，通过连续时间序列的模拟，反映流域内水分、泥沙和化学物质的输入输出过程。SWAT 模型的结构包括水文循环的陆地阶段和水文循环的汇流阶段。陆地阶段控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质和化学物质等的输入量，而汇流阶段则决定这些物质从河网向流域出口的输移运动^[3]。模型还引入了多水文响应单元 (HRU)，以考虑不同土地利用和土壤类型对水文过程的影响。

1.2 SWAT 模型在国内外流域径流模拟中的应用案例

SWAT 模型作为一种先进的分布式水文模型，因其强大的模拟能力和广泛的适用性，在国内外流域径流模拟中均得到了广泛应用。

在美国，SWAT 模型被广泛应用于水资源管理的多个方面。它不仅能够预测水资源的供需情况，为水资源的合理分配和利用提供科学依据，还能够评估土地利用变化对水质的影响，为环境保护和生态修复提供有力支持。此外，SWAT 模型还被用于评估气候变化对美国水文过程的影响，为决策者制定适应性策略提供了重要参考。

在欧洲国家，SWAT 模型同样发挥着重要作用。它被用于评估气候变化对欧洲各流域水文过程的具体影响，为流域管理规划提供了科学依据。通过模拟不同气候变化情景下的水文响应，SWAT 模型帮助欧洲各国更好地理解气候变化对水资源的影响，从而制定了更为科学的流域管理策略^[4]。

在国内，SWAT 模型的应用也日益广泛。针对黄河流域、太湖流域和长江流域等重要流域，研究人员利用 SWAT 模型对流域水文过程进行了深入模拟和评估。通过模拟流域水量变化、水质变化以及土壤侵蚀等影响因素，SWAT 模型为这些流域的水资源管理和土地利用规划提供了重要参考，有力推动了我国水

资源管理的科学化和精细化进程^[5]。

1.3 SWAT 模型在气候变化研究中的适用性

SWAT 模型在气候变化研究中具有适用性。由于气候变化对水文过程的影响日益显著，SWAT 模型能够模拟不同气候情景下的流域水文响应，为气候变化影响评估和适应性管理提供有力工具。通过输入不同的气候变化数据，SWAT 模型可以预测未来流域内水量、水质和土壤侵蚀等的变化趋势，为制定适应气候变化的策略提供科学依据。此外，SWAT 模型还具有开放源代码的特点，这为模型改进和适应不同研究需求提供了基础。研究人员可以根据实际需要，对模型进行修改和扩展，以更好地适应气候变化研究的需求^[6]。SWAT 模型是一个功能强大的分布式流域水文模型，在国内外流域径流模拟和气候变化研究中得到了广泛应用。通过合理利用 SWAT 模型，我们可以更深入地了解流域水文过程的变化规律，为水资源管理和环境保护提供科学依据。

2 流域径流模拟的挑战

2.1 气候变化的复杂性与不确定性

气候变化对流域径流的影响具有显著的复杂性和不确定性。由于气候系统的复杂性，准确预测未来的气候变化情景变得相当困难。此外，即使能够预测气候变化趋势，但极端天气事件的模拟能力仍然较差，这进一步增加了流域径流模拟的不确定性。这种不确定性对流域水资源管理和防洪减灾规划提出了严峻挑战^[7]。

2.2 数据获取与处理的难度

流域径流模拟需要多种类型的数据支持，包括气候数据、地形数据、土壤数据和植被数据等。然而，这些数据在获取和处理方面存在不小的难度。

2.2.1 气候数据

气候数据是流域径流模拟的基础，但观测年限较短和观测采样频率低导致数据稀缺。此外，气候变化导致的降水、蒸发等气候要素的时空分布变化也增加了数据处理的复杂性。

2.2.2 地形、土壤、植被等数据

地形数据对流域径流模拟的精确度具有重要影响。然而，高精度地形数据的获取难度较大，且对计算设施有较高要求。土壤和植被数据同样对流域径流模拟具有重要影响，但这些数据的获取和处理同样面临诸多困难。例如，土壤数据的获取需要进行详细的土壤调查，而植被数据的获取则需要考虑植被类型、分布和生长状况等多种因素。

2.3 模型参数确定与验证的复杂性

SWAT 模型等流域径流模拟模型包含大量的参数，这些参数的确定和验证是模型应用中的关键步骤。然而，由于流域水文过程的复杂性和不确定性，参数的确定和验证变得相当困难。此外，不同流域的气候、地形、土壤和植被等条件存在差异，导致模型参数的通用性较差，进一步增加了参数确定与验证的复杂性。

2.4 人类活动对流域水文过程的影响

人类活动对流域水文过程的影响也是流域径流模拟面临的重要挑战之一。人类活动通过改变流域下垫面条件（如土地利用方式、植被覆盖等）和修建水利工程等方式，直接或间接地影响流域径流的流量大小、水质好坏和径流过程线形状。这

种影响使得流域径流模拟更加复杂和不确定。流域径流模拟面临着气候变化的复杂性与不确定性、数据获取与处理的难度、模型参数确定与验证的复杂性以及人类活动对流域水文过程的影响等多重挑战。为了克服这些挑战，需要加强气候变化研究、提高数据获取和处理能力、优化模型参数确定与验证方法以及深入研究人类活动对流域水文过程的影响机制^[8]。

3 流域径流模拟的机遇

流域径流模拟在面临挑战的同时，也孕育着诸多机遇，以下是对这些机遇的详细阐述：

3.1 SWAT 模型在精细化模拟方面的优势

SWAT 模型作为分布式流域水文模型，在精细化模拟方面具有显著优势。其能够模拟流域内不同土地利用和土壤类型对水文过程的影响，通过引入多水文响应单元（HRU），提高了模拟的精确度^[9]。此外，SWAT 模型还考虑了物质循环的多个方面，能够模拟多种物质的迁移和转化过程，为流域水资源管理和环境保护提供了更为全面和深入的见解。

3.2 气候变化研究为流域管理提供的新视角

随着气候变化的日益显著，其对流域水文过程的影响也成为研究热点。气候变化研究为流域管理提供了新的视角，即通过预测未来气候变化情景下的流域水文响应，制定适应气候变化的策略。SWAT 模型等流域径流模拟工具能够模拟不同气候情景下的流域水文过程，为评估气候变化对流域水资源的影响和制定适应性管理对策提供科学依据。

3.3 技术进步对数据获取与处理的支持

技术进步为流域径流模拟提供了更为丰富和准确的数据支持。随着遥感技术、GIS 技术和大数据技术的发展，获取高精度地形数据、土壤数据、植被数据以及气候数据变得更加便捷。此外，数据处理和分析技术的提高也使得这些数据能够更有效地应用于流域径流模拟中。这些技术进步为流域径流模拟的准确性和可靠性提供了有力保障^[10]。

3.4 跨学科合作带来的新机遇

流域径流模拟涉及多个学科领域的知识和技术，如气象学、水文学、地理学、生态学等。跨学科合作能够汇聚不同领域的研究力量，共同解决流域径流模拟中的难题。通过跨学科合作，可以深入研究气候变化和人类活动对流域水文过程的影响机制，优化模型参数和验证方法，提高流域径流模拟的准确性和实用性。同时，跨学科合作还能够促进不同学科之间的知识交流和融合，为流域管理和水资源保护提供更为全面和创新的解决方案。流域径流模拟在面临挑战的同时也孕育着诸多机遇^[11]。通过充分利用 SWAT 模型在精细化模拟方面的优势、气候变化研究提供的新视角、技术进步对数据获取与处理的支持以及跨学科合作带来的新机遇，我们可以更加深入地了解流域水文过程的变化规律，为流域水资源管理和环境保护提供更为科学、全面和创新的解决方案。

结论

基于 SWAT 模型的流域径流模拟在气候变化条件下，既面临着显著的挑战，也蕴含着丰富的机遇。从挑战的角度来看，气候变化的复杂性与不确定性、数据获取与处理的难度、模型参数确定与验证的复杂性以及人类活动对流域水文过程的影响，都增加了流域径流模拟的难度和不确定性。这些挑战要求

我们在模型应用过程中，需要更加注重数据的准确性和完整性，加强模型参数的优化和验证，以及深入研究人类活动对流域水文过程的影响机制。然而，从机遇的角度来看，SWAT 模型在精细化模拟方面的优势、气候变化研究为流域管理提供的新视角、技术进步对数据获取与处理的支持以及跨学科合作带来的新机遇，都为流域径流模拟的发展提供了广阔的空间^[12]。SWAT 模型的精细化模拟能力有助于我们更深入地了解流域水文过程的变化规律，为流域水资源管理和环境保护提供科学依据。气候变化研究则为我们提供了预测未来流域水文响应的新视角，有助于制定适应性管理策略。技术进步和跨学科合作则进一步推动了流域径流模拟技术的发展和革新。

综上所述，基于 SWAT 模型的流域径流模拟在应对气候变化挑战的同时，也抓住了时代赋予的机遇。未来，我们需要继续加强模型应用和研究，不断提高流域径流模拟的准确性和实用性，为流域水资源管理和环境保护贡献更多智慧和力量。

【参考文献】

- [1]王好芳，代晨洋，张玮珂，等。基于水质目标的小清河流域邹平段污染物综合治理效果评价[J/OL]。农业工程学报，1-9[2024-11-05]。
 - [2]柏建雯。多元校准策略对水文模型性能的影响研究综述[J/OL]。人民长江，1-13[2024-11-05]。
 - [3]梁丽莎，蒋晓蕾，胡乐怡，等。基于 XGBoost 与 SWAT 径流模拟对比及校正研究[J/OL]。人民珠江，1-18[2024-11-05]。
 - [4]焦芳菲，郑航，刘悦忆。汉江流域水源涵养服务价值及改进的空间转移评价[J/OL]。水利水电技术（中英文），1-21[2024-11-05]。
 - [5]胥鹏君，孙颖娜。基于 SWAT 模型的西南岔河流域洪水资源利用潜力分析[J]。吉林水利，2024，（10）：67-71。
 - [6]孟丽红，范旋，何欢，等。基于 SWAT 模型的鄱阳湖流域典型年份蓝绿水时空变化特征研究[J]。安徽农业科学，2024，52（19）：59-64+113。
 - [7]张健，郑萌。基于 SWAT 模型的黑河流域径流研究[J]。河北水利，2024，（09）：29-31+35。
 - [8]王子尧，左其亭，巴音吉，等。基于 SWAT 和 STIRPAT 模型的沁河流域生态基流保障及人为影响因素[J/OL]。南水北调与水利科技（中英文），1-13[2024-11-05]。
 - [9]吴子璇。基于 SWAT 模型的城市化土地利用及景观格局变化的水文效应研究[J]。测绘标准化，2024，40（03）：77-84。
 - [10]杨承华，胡恩，田涛。基于 SWAT 模型的汉江流域汉中段水文要素研究[J]。水资源开发与管理，2024，10（10）：1-9+40。
 - [11]王佩瑜。夜间灯光改进 SWAT 模型的建成区径流模拟[J]。水利科技与经济，2024，30（09）：88-92。
 - [12]代杰，张斌，杨丽。基于 SWAT 模型的喀斯特小流域产沙产流模拟研究[J]。测绘与空间地理信息，2024，47（08）：199-203。
- 作者简介：田恬，1990.3，女，汉，吉林省吉林市，助教，硕士研究生，研究方向：流域水循环与水环境。
- 课题：未来气候对松花江流域上游区径流变化影响研究，吉林工业职业技术学院科学研究项目 项目编号：23KY04KJY。