

基于文献计量学的 SWAT 模型发展趋势研究

冯紫微¹, 吴琳娜^{1,2,3*}, 穆田宝¹, 王丹¹, 张广映¹

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 省部共建公共大数据
国家重点实验室, 贵阳 550025; 3. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 【目的】梳理国际上 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型研究进展, 揭示 SWAT 模型研究发展趋势。【方法】汇总分析 Web of Science (WOS) 核心合集数据库中 1994—2022 年间与 SWAT 模型的相关论文, 采用 VOSviewer、CiteSpace 和基于 R 语言的 Biblioshiny 3 种文献计量工具对文献计量分析。从发文量、发文期刊、研究机构和作者影响力、高被引文献、关键词和主题演化等多个角度分析了 SWAT 模型的受关注程度、知识基础和研究前沿。【结果】①1994—2022 年间 SWAT 模型研究领域论文共有 3 496 篇, 2006 年后与该研究主题相关论文数量快速增长, 2008 年以来中国发文量迅速增长, 在 2019 年超过了美国, 成为全球 SWAT 模型研究发文量最多的国家。②SWAT 模型研究的主要发文期刊有《JOURNAL OF HYDROLOGY》《HYDROLOGICAL PROCESSES》《WATER》等。最具影响力的国外发文作者是美国的 SRINIVASAN R 和 ARNOLD J G, 国内发文作者是沈珍瑶、陈磊、欧阳威等。③北京师范大学、德克萨斯农工大学、中国科学院大学、河海大学、武汉大学等是 SWAT 模型的重要研究机构。各国及各研究机构之间对于 SWAT 模型的研究密切合作, 极大地推动了这一领域全球化发展。④SWAT 模型应用研究领域主要集中在水资源、环境科学与生态学等学科。⑤SWAT 模型研究的热点主要聚焦于径流模拟、土地利用和气候变化对水文过程影响的评估、土壤侵蚀、污染负荷等方面。【结论】未来 SWAT 的研究也面临着诸多挑战, 讨论 SWAT 模型参数率定以及模型不确定性、不同流域尺度对于模型构建的影响、SWAT 模型的改进、考虑多种应用情景下的模型耦合、气候变化和人类活动对水资源的影响将成为未来 SWAT 模型的研究重点。

关键词: SWAT 模型; 文献计量学; 知识图谱; 水文学; Web of Science

中图分类号: P349

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023273

OSID: 

冯紫微, 吴琳娜, 穆田宝, 等. 基于文献计量学的 SWAT 模型发展趋势研究[J]. 灌溉排水学报 2024, 43(2): 85-95.

FENG Ziwei, WU Linna, MU Tianbao, et al. Application and development of SWAT model: A bibliometric analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 85-95.

0 引言

【研究意义】全球气候变化影响加剧, 水资源安全保障形势日益严峻, 对水资源管理提出了更大的挑战。水文模型在水资源管理中发挥着至关重要的作用, 能预测水资源的可用性、动态快速模拟自然界中水运动、为水资源综合管理、平衡水资源需求和水资源可持续利用提供基础^[1-3]。水文模型也是评估气候变化对水资源影响和水文模式的重要工具^[4-5]。其中, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部农业服务中心于 20 世纪 90 年代初期开发的面向流域、长时间尺度的分布式水文模

型^[6]。目前关于 SWAT 模型的中英文文献数据库已收录了超过 5 000 篇同行审阅的文献, 该模型在水文循环、土壤侵蚀、污染物负荷、气候变化与土地利用变化对水循环的影响等方面得到广泛应用^[7]。综述其发展趋势和应用研究成果对该模型的深入应用研究具有重要意义。

【研究进展】目前关于 SWAT 模型的文献综述主要针对特定应用领域、特定的国家^[8-10]和特殊流域^[11-12]的水文时空分布规律、模型数据输入、水文参数校准和验证结果等方面的内容做出了相对应的评价。在农业领域, 多集中于干旱/半干旱地区 SWAT 模型在水资源管理中的应用^[13]和在农业农药运移过程^[14]中的研究。也有学者总结了 SWAT 模型在水运移复杂的喀斯特岩溶地区的应用^[15]、评估生态服务系统过程^[16]、极端降水情况^[17]下的水文运移规律方面的重要研究。【切入点】但是, 当前关于 SWAT 模型研究领域综述缺乏一些定量分析, 相关研究的重点演进过程不清楚, 并且从文献计量角度

收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目 (U1612442); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA2806201); 贵州大学引进人才科研项目 (贵大人基合字 (2017) 78 号)

作者简介: 冯紫微 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感水文研究。E-mail: tiny_ziweifeng@163.com

通信作者: 吴琳娜 (1980-), 女, 副教授, 主要从事遥感水文, 时空数据融合集成与挖掘研究。E-mail: lnwu@gzu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

综述 SWAT 模型研究现状、热点和研究态势的研究较少。文献计量学将数学、图形学、可视化技术、信息统计学科等方法结合,利用可视化的图谱形象地展示学科的核心结构、发展历史、前沿领域以及整体知识架构,为学科研究提供切实、有价值的参考^[18]。【拟解决的关键问题】本文通过文献计量可视化工具,以 Web of Science 核心合集 SCI 扩展数据库 (SCI-EXPANDED) 为数据源,从 SWAT 模型发文数量变化、出版物类别、发表刊物、发表机构及作者合作和影响力等方面统计分析。分析刊物的国家/地区/作者的分布,并构建国家/地区/机构之间的合作网络。通过关键词共现分析,引出关键词背景下的主要研究重点,以期揭示在 1994—2022 年来 SWAT 模型的研究热点及其发展趋势,推动 SWAT 模型深入应用研究,为未来 SWAT 水文模型在水资源管理领域的发展提供合理有效的参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

根据检索公式: TS=(SWAT MODEL and The Soil and Water Assessment Tool) 在 Web of Science 核心合集 SCI 扩展数据库 (SCI-EXPANDED) 中对 SWAT 模型研究文献进行搜索。获得 3 650 篇文献 (更新至 2023 年 4 月 19 日)。通过时间维度限制、同义关键词筛选、主题无关等条件剔除后,最终确定文献数据 3 496 篇。

1.2 分析方法

本研究采用构建可视化文献计量网络的软件工具 VOSviewer^[19-20]和集计量学、数据和信息可视化为一体的科学知识图谱绘制工具 CiteSpace,以及数据处理工具 Pajek 和 R 应用程序^[21]对收集到的文献进行分析,绘制知识图谱,研究不同时期、不同国家的研究进展和热点方向、国家合作聚类、关键词演变、关键词共现聚类等 (图 1)。对于 SWAT 模型相关文献的影响力采用 h 指数判定;h 指数用来

量化科学发现的广泛影响和相关性,h 指数越高,表明文献影响力越大^[22]。

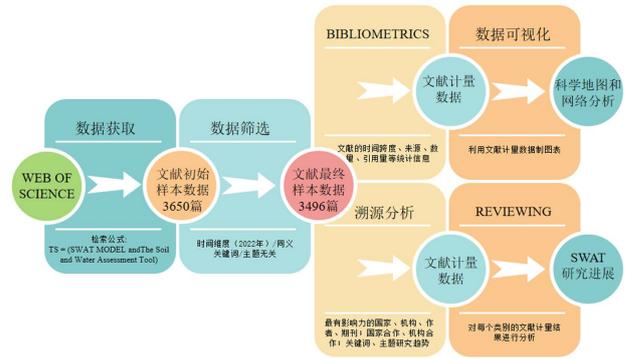


图 1 方法流程图

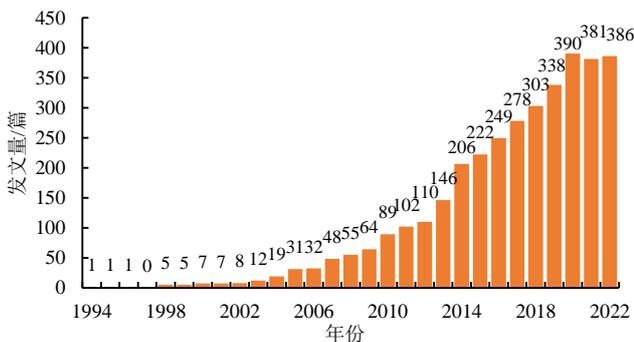
Fig.1 Method flow chart

2 结果与讨论

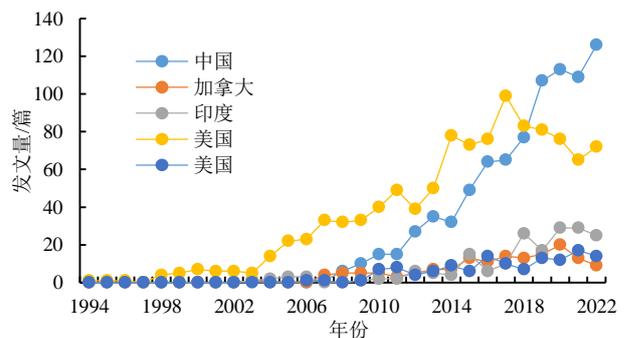
2.1 统计结果与数据分析

2.1.1 发文数量变化分析

统计分析不同发文国家文献数量变化 (图 2), 结果表明“SWAT 模型”研究文献数量逐年增加, 发文数量最多的前五个国家是: 美国 (1 022 篇)、中国 (730 篇)、印度 (161 篇)、加拿大 (142 篇)、韩国 (116 篇)。自 2008 年以来, 中国发文数量迅速增长, 超过了加拿大、韩国、印度等国家, 并在 2019 年超过了美国。说明近年来, 中国学者对 SWAT 模型关注更加突出, 逐渐占据国际主导。从图 2 (a) 可知, 第一篇以“SWAT 模型”为主题的论文发表于 1994 年, 题为“INTEGRATION OF A BASIN-SCALE WATER QUALITY MODEL WITH GIS^[23]” (流域尺度水质模型与 GIS 的集成), 该研究实现了 SWAT 与地理信息系统的耦合。2006 年后, 与“SWAT”研究主题相关论文数量快速增长, 2013—2014 年增长速度最大, 增长率为 42%, 2020 年后论文数量增长率降低, 但是发文量仍然较大, 2022 年发文总量达到 386 篇。说明“SWAT 模型”研究仍然是目前水文模型研究的热点。



(a) 每年发表的文章数量



(b) 发文量前五的国家

图 2 搜索词“SWAT MODEL”相关文献指标

Fig.2 Literature related to the search term “SWAT MODEL”

2.1.2 发文主要期刊分析

分析 SWAT 模型研究的主要发文刊物，主要集中在 332 个出版物。将 h 指数值最高的前十个出版物列于表 1。由表 1 可知，发表在《JOURNAL OF HYDROLOGY》的文章 h 指数最大，对 SWAT 模型研究的影响最大，总发文量达到 259 篇，总被引量为 13 644 次。其次是《HYDROLOGICAL

PROCESSES》，总发文量达到 154 篇，总被引量为 8 357 次。《WATER》在 SWAT 模型研究领域发表了 392 篇论文，在所有期刊中发文量最大，其次是《SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT》，有 169 篇论文。这些期刊在推动 SWAT 模型应用研究中发挥了至关重要的作用。

表 1 排名前十的期刊出版物影响力

Tab.1 Top 10 journal publications by impact

Element	h_index	文章总引次数 (TC)	出版物的数量 (NP)	年份 (PY_start)
JOURNAL OF HYDROLOGY	58	13 644	259	2000
HYDROLOGICAL PROCESSES	52	8 357	154	2004
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	45	6 030	169	2003
JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION	37	10 569	118	1998
TRANSACTIONS OF THE ASABE	37	8 621	114	2006
WATER	32	4 967	392	2011
AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT	30	2 640	81	2003
ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	30	2 580	87	2006
HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	30	2 814	68	2002
WATER RESOURCES MANAGEMENT	29	2 635	89	2007

2.2 合作与影响力分析

2.2.1 国家合作

运用 VOSviewer (版本 1.6.18) 和 R Studio 进行 co-country 分析，结果如图 3。图 3 中的球形大小代表国家之间的研究合作发文量，彩色连线表明各国作者之间的合作程度。从图中可以看出发文量最多的有中国、美国、加拿大、澳大利亚等国，各国

之间合作网络交错复杂，说明 SWAT 模型受到世界各国学者广泛关注，各国之间的交流合作较多、合作密切，也代表 SWAT 模型研究的成熟发展。从图中看到美国主要与中国、韩国、加拿大等国家合作，而中国主要与美国、加拿大、澳大利亚、巴基斯坦等国家合作。

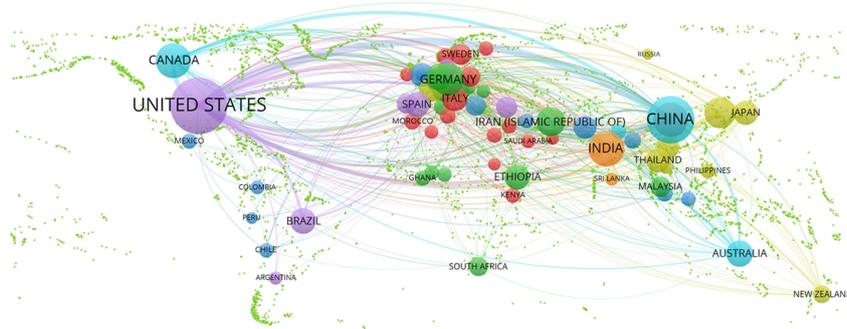


图 3 全球各个国家间关于 SWAT 模型研究合作的地图

Fig.3 Map of global collaboration on SWAT model research among various countries

2.2.2 发文机构影响力及合作分析

统计发文总量和总被引频次评估研究机构或高校对 SWAT 研究的影响力，制作排名前十的研究机构统计图 (图 4)。从图 4 可知，中国的 Beijing Normal University (北京师范大学) 发表相关文献的总量为 112 篇，总被引用次数是 3 474 次；美国的 Texas A&M University (德克萨斯农工大学) 发文总量为 54 篇，总被引用次数是 2 021 次；美国的 Purdue University (普渡大学) 发文总量为 51 篇，总被引用次数是 2 110 次；以及美国马里兰大学、印度理工学院、中国河海大学、中国武汉大学、密歇根州立大学、中国科学院大学、韩国建国大学等

这些研究机构对 SWAT 的研究产生了重要的影响。

制作全球 SWAT 相关研究机构合作图谱 (图 5)，图中科学协作网络中的网络节点是第一作者所在的研究机构，链接是共同作者所在的研究机构。从图 5 可以看出第一作者所在研究机构较为突出的有 Beijing Normal University (北京师范大学)、Texas A&M University (德克萨斯农工大学)、Grassland, Soil and Water Research Laboratory (草原土壤水研究实验室) 等。在以 Beijing Normal University (北京师范大学) 为中心节点的研究机构合作图谱中，合作的大多是中国的科研机构，其中中国科学院大学及中国科学院地理科学与自然资源研究所、西北农

林科技大学、武汉大学等机构为北京师范大学在中国的主要合作机构。与北京师范大学合作的国外机构主要有 Texas A&M University (德克萨斯农工大学)、Grassland, Soil and Water Research Laboratory (草原水土研究实验室)、The University of Maryland (马里兰大学) 等。

学)、Grassland, Soil and Water Research Laboratory (草原水土研究实验室)、The University of Maryland (马里兰大学) 等。

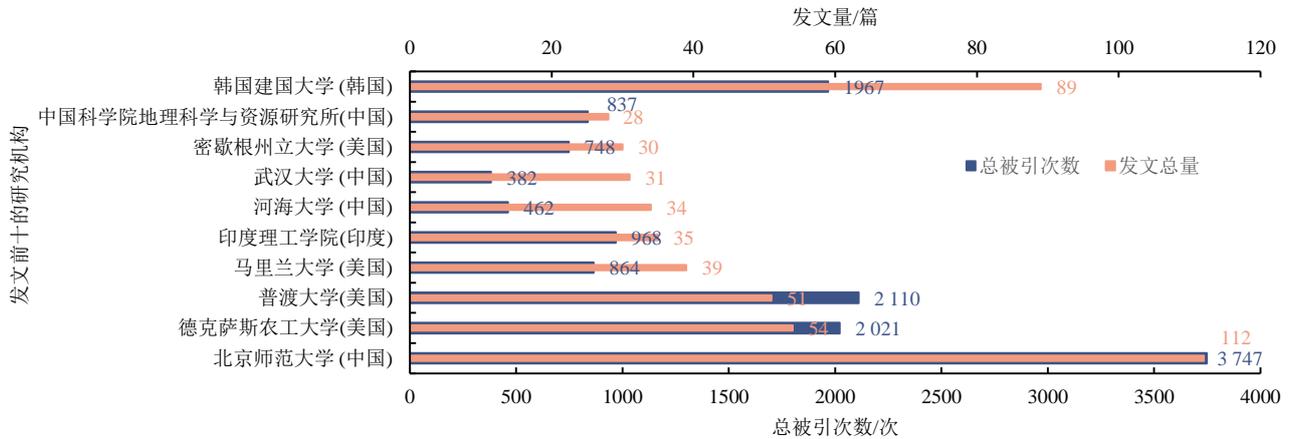


图 4 SWAT 相关研究的发文总量排名前十的研究机构

Fig.4 Top 10 research institutions in terms of the total number of articles published on SWAT-related research

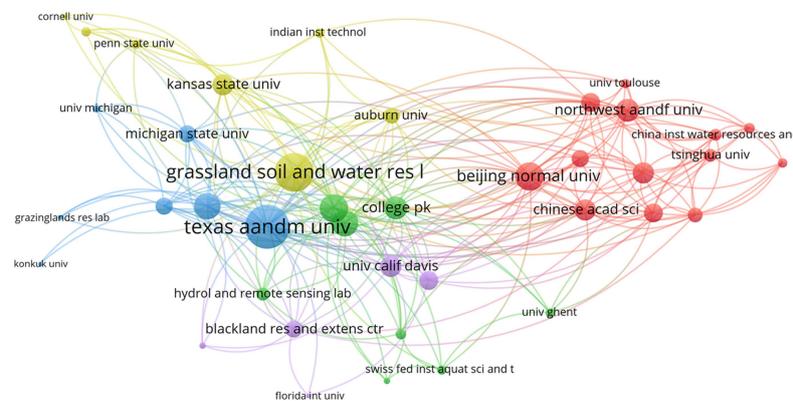


图 5 全球 SWAT 相关研究机构合作图谱

Fig.5 Global SWAT-related research institution cooperation map

2.2.3 发文作者影响分析

采用 h 指数对学者的影响度进行排序。如表 2 所示, 影响力最大和产出最多的作者来自美国的 SRINIVASAN R (h-index 为 53, 总发文量 186 篇, 总被引 19 221 次) 和 ARNOLD J G (h-index 为 53, 总发文量 126 篇, 总被引 18 297 次), 二位学者在 SWAT 研究领域影响力较大, 二人在 1994 年合作发表了第一篇文章 “INTEGRATION OF A BASIN-SCALE WATER QUALITY MODEL WITH GIS^[23]”。紧随其后的是来自英国阿斯顿大学的 GASSMAN PW (总发文量 45 篇), 来自土耳其伊斯坦布尔 CHAUBEY I (总发文量 47 篇)。中国学者在 SWAT 模型的研究方面虽起步较晚, 但学者们在该研究领域也极具影响力, 在前 25 位 SWAT 模型影响力较高的学者中占据了 16%。分别是北京师范大学沈珍瑶、陈磊、欧阳威以及西安交通大学吴一平。

表 2 排名前十的作者影响力

Tab.2 Top 10 authors by influence

Element	h_index	总被引量 TC	发文量 NP	发表年份 PY_start
SRINIVASAN R	53	19 221	186	1994
ARNOLD J G	50	18 297	126	1994
GASSMAN P W	29	6 077	45	2000
CHAUBEY I	27	2 075	47	2005
ABBASPOUR K C	26	6 271	37	2007
SHEN Z Y	24	1 667	43	2008
WU Y P	22	1 369	32	2011
MELESSE A M	21	1 881	25	2005
VAN GRIENSVEN A	21	3 152	37	2005
WHITE M J	20	2 794	35	2009

2.2.4 高被引文献特征分析

统计与 SWAT 模型研究领域被引次数前十的文献, 相关信息列于表 3。从表 3 可知, 总被引量第一的文献是 Arnold 等^[6]在 1998 年发表的题为 “LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT - PART 1: MODEL DEVELOPMENT” 的文章, 共 4 906 次引用, 平均引用次数为 188.69 次。文章对 SWAT 模型的操作、程序应用概述、模型框架结构进行了说明, 为后续学者对模型的应用

提供了重要理论研究基础，因此这篇文章也受到同一研究领域学者的更多关注和多次引用。SWAT 是一个包括手动和自动校准技术的一种复杂的流域模型，在 ARNOLD J G 发表的总被引次数排名第 3 的文章^[24]中提到在 SWAT 模型校准的过程中应考虑空间方面、模型效率、不确定性以及用户对水文过程的理解，以避免仅仅依赖于自动程序，并确保现实的参数化。ARNOLD J G 在 2005 年发表的文章中总结了 SWAT2000 模型的最新版本中新增的模块及重要改进，最新版本的 SWAT 模型新增溶质迁移过程、

入渗、天气发生器的改进等使其越来越适用于流域的综合管理过程。ARNOLD J G 的文章关注 SWAT 模型的基本原理、应用、参数调整等，提供给后续研究者们更多的理论支撑以及 SWAT 模型在各个方面的拓展应用。GASSMAN P W 学者与 ARNOLD J G 学者在关于 SWAT 模型的研究过程中合作密切，产生了许多对该研究领域具有重要价值的成果。这些最高被引文献为 SWAT 模型的发展与流域水循环模拟提供了重要价值、也为后续研究者产生高质量文章提供了重要支撑。

表 3 与 SWAT 模型研究相关的十大最高被引用文献

Tab.3 Top 10 most cited literature related to SWAT model studies

文章标题	作者	期刊来源	总被引量	平均被引量	发文年份
LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT - PART 1: MODEL DEVELOPMENT ^[6]	ARNOLD J G; SRINIVASAN R	JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION	4 906	188.69	1998
THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL: HISTORICAL DEVELOPMENT, APPLICATIONS, AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS ^[25]	GASSMAN P W; REYES M R	TRANSACTIONS OF THE ASABE	1 875	110.29	2007
SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION ^[24]	ARNOLD J G; MORIASI D N	TRANSACTIONS OF THE ASABE	1 675	139.58	2012
MODELLING HYDROLOGY AND WATER QUALITY IN THE PRE-ALPINE/ALPINE THUR WATERSHED USING SWAT ^[26]	ABBASPOUR K C; YANG J	JOURNAL OF HYDROLOGY	1 218	71.65	2007
VALIDATION OF THE SWAT MODEL ON A LARGE RIVER BASIN WITH POINT AND NONPOINT SOURCES ^[27]	SANTHI C; ARNOLD J G	JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION	985	42.83	2001
HYDROLOGIC AND WATER QUALITY MODELS: PERFORMANCE MEASURES AND EVALUATION CRITERIA ^[28]	MORIASI D N; GITAU M W	JOURNAL OF HYDROLOGY	946	105.11	2015
SWAT2000: CURRENT CAPABILITIES AND RESEARCH OPPORTUNITIES IN APPLIED WATERSHED MODELLING ^[29]	ARNOLD J G; FOHRER N	HYDROLOGICAL PROCESSES	919	48.37	2005
A CONTINENTAL-SCALE HYDROLOGY AND WATER QUALITY MODEL FOR EUROPE: CALIBRATION AND UNCERTAINTY OF A HIGH-RESOLUTION LARGE-SCALE SWAT MODEL ^[30]	ABBASPOUR K C; ROUHOLAHNEJAD E	JOURNAL OF HYDROLOGY	841	93.44	2015
IMPACTS OF LAND USE CHANGE AND CLIMATE VARIABILITY ON HYDROLOGY IN AN AGRICULTURAL CATCHMENT ON THE LOESS PLATEAU OF CHINA ^[31]	LI Z; LIU W Z	JOURNAL OF HYDROLOGY	506	33.73	2009
ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESOURCES IN IRAN ^[32]	ABBASPOUR K C; FARAMARZI M	WATER RESOURCES RESEARCH	372	24.8	2009

3 SWAT 模型研究发展分析

3.1 研究领域分析

使用 bibliometrix 工具提取分析 SWAT 模型的重点研究领域，前十大研究领域分别是水资源、环境科学与生态学、工程、地质学、农业、科学与技术-其他主题、气象学和大气科学、计算机科学、海洋与淡水生物学、遥感，包含的文献总数共有 3 453

篇，占总文献数 3 496 的 98.77% (图 6)。其中，在水资源和环境科学与生态学领域的发文量最大，逐年增长的速度也最快；其次在工程和地质学应用领域发文量较大，呈现逐年增加特点，但增加速度低于在水资源和环境科学与生态学领域的发文量；从 2015 年开始，在农业领域的发文量呈现减少趋势，到 2020 年和其余五大研究领域发文量相当。

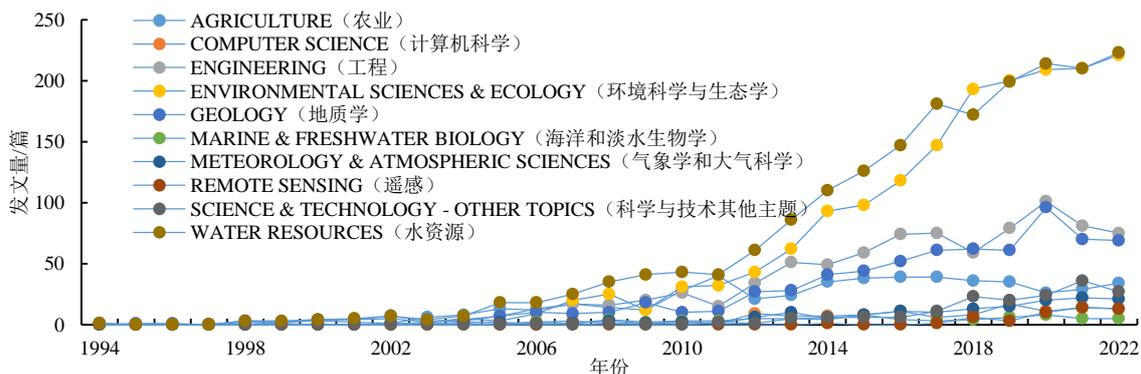


图 6 SWAT 模型前十大研究领域年发文量统计图

Fig.6 Statistics on the annual number of articles published in the top ten research areas of the SWAT model

3.2 研究热点

运用 VOSviewer (版本 1.6.18) 共现分析 SWAT 模型主题研究关键词, 得到图 7。从图 7 可以看出, 关键词分为 7 个聚类。其中红色、绿色、蓝色、黄色和紫色聚类较为突出, 关键词间的相关性较强。红色聚类由 151 个关键词聚类组成, 主要集中于运用 SWAT 模型模拟非点源污染物的运移研究, 揭示农业非点源污染物 N 和 P 是中国河流和湖泊富营养化的主要原因之一^[33], 该模型很好地模拟解决非点源 N 和 P 的来源和运移途径时空变化的不确定性问题。说明 SWAT 模型对于污染物的研究已

经发展到较为成熟的阶段, 也是世界各国学者研究的一个热点。绿色聚类与蓝色聚类突显研究聚焦在气候变化背景下的水循环过程时空变化规律。黄色聚类则主要关注 SWAT 模型在运行过程中的参数敏感性、模型不确定以及模型的适用性。紫色聚类由 107 个关键词聚类组成, 其中 Swat model、climate change、runoff、catchment、land use change、sediment yield 关键词较为突出, 表明利用 SWAT 模型分析气候变化和人类活动双重影响对水资源的评估及预测研究也是 SWAT 模型应用研究的热点。

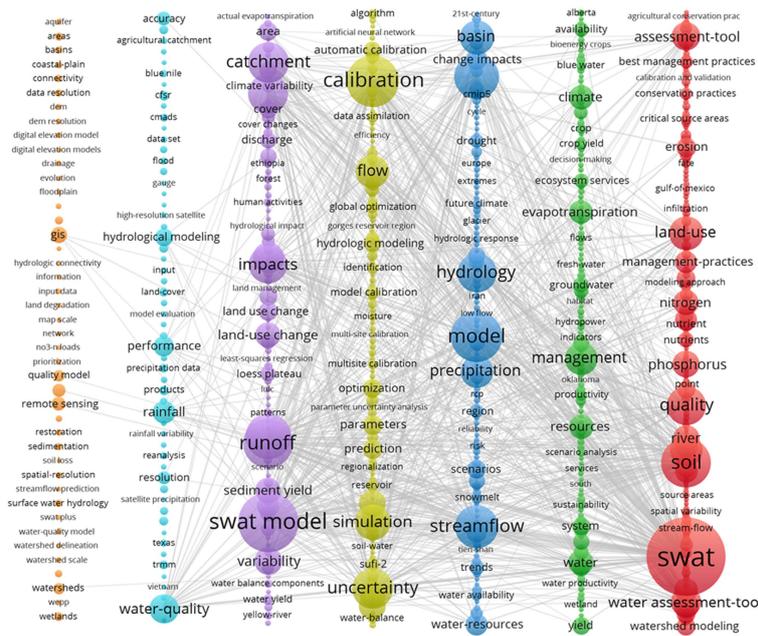


图 7 SWAT 模型关键词网络可视化

Fig.7 Network visualization of SWAT model keyword

3.3 SWAT 模型发展演化过程及重要研究成果

以 1998、2006、2012 年为时间分界点, 采用 bibliometrix 工具描述从 1994 年到 2022 年的 SWAT 模型研究主题演变过程 (图 8、图 9)。并结合 citespace 对 SWAT 模型研究分阶段进行关键词共现

分析, 得到 1994—2022 年主题演变的侧重点。将 SWAT 模型的发展历程分为 4 个阶段: 萌芽阶段 (1994—1998 年)、探索阶段 (1999—2005 年)、演化阶段 (2006—2012 年)、突破阶段 (2013 年开始)。

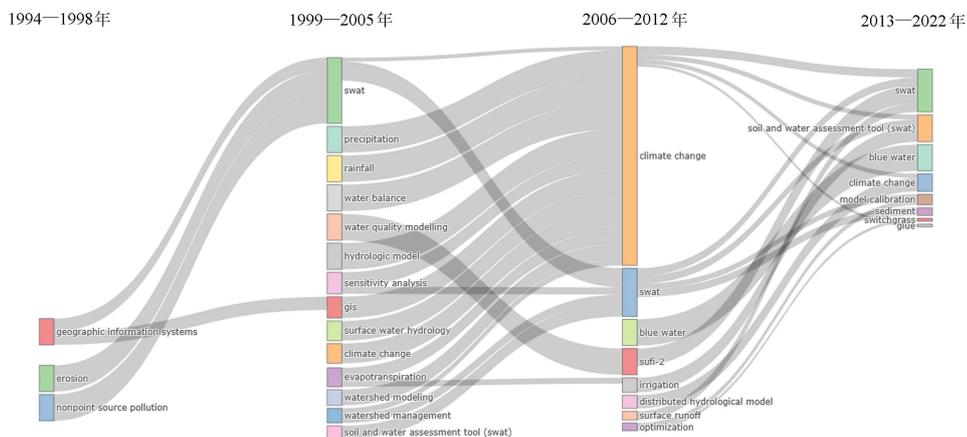


图 8 SWAT 模型研究演化分析图

Fig.8 SWAT model theme evolution analysis diagram

新技术的发展,部分学者从多模型耦合的角度打破 SWAT 水文模型的局限性,提高模型模拟精度和拓展专业应用领域,解决更多的尖端和前瞻性的科学问题^[49-51],降低了模型的不确定性。多模型的耦合将成为 SWAT 模型未来研究的重点。

4 讨论

1) SWAT 模型的应用已非常成熟并且应用领域广泛。但是 SWAT 模型研究也面临着诸多挑战,在模型参数率定以及模型不确定性问题上,由于抽象的水文模型与真实的水文系统上存在着偏差,并且在水文模拟过程中参数的空间差异性及其获取的误差等导致模型模拟过程中以及模拟结果上存在许多不确定性。SWAT 模型参数率定有手动校准和 SWAT-CUP 等参数率定方法,手动校准中的参数依赖于人工经验,而 SWAT 模型官网自带的 SWAT-CUP 自动校准过程需要数千次模拟运行和多次校准迭代,导致参数优化过程复杂并且耗时较长。有学者基于云计算不确定分析系统自动生成一组关于 SWAT 模型参数校准过程中的不确定性信息,这有助于有效地降低模型的不确定性,提升模型运行效率。未来的研究在模型参数率定以及模型不确定性问题上应注重理解参数的物理意义,耦合多源信息采集手段、将其它参数不确定分析方法应用于 SWAT 模型,有效地提高模型运行效率和减少模拟的不确定性。

2) 流域尺度也是水文模型模拟的重要影响因素。目前,SWAT 模型应用在小流域模拟效果较好,但在大尺度流域上的应用较少^[52]。SWAT 模型应用于大尺度流域模拟研究中,模拟精度较低,很大程度上是因为大尺度流域的不确定因素较多,特别是在因裂隙、地表地下连通的水文结构复杂的喀斯特大尺度流域水文过程模拟中产生了较多的不确定性^[53]。同时,在大尺度流域,数据输入也是造成模型不确定性的重要因子之一。DEM 精度影响流域的划分、气象数据的代表性影响模拟精度的准确性,这些都会造成在大尺度流域 SWAT 模型的应用。大尺度和小尺度流域 SWAT 模拟过程关键的参数和表现出来的敏感性也各有不同,很大程度上造成了结果的不确定性^[54]。并且一些大尺度流域地形起伏复杂,资料获取难度大、成本高。学者已将各种遥感气候产品、气候资料和一些再分析降水产品作为水文模型的数据输入,以提高在气象数据资料缺失情况下导致的模拟精度受限问题。未来的研究应加强 SWAT 模型对于大尺度流域应用的进一步探索与检验,提高遥感数据产品应用于大尺度流域 SWAT 模型的可行性和精度,分析大尺度流域模拟过程中的限制因

素,以提高其在不同尺度流域应用的精度。

3) 开源的 SWAT 模型能够耦合不同的应用场景需求,更好地扩展模型功能,对特殊的水文过程进行模拟。通过多模型耦合更加准确、有效地模拟地表水与地下水系统之间的相互作用,对于水资源的准确评价、科学开发利用、有效管理以及生态环境的保护具有重要意义。同时,受到不同下垫面特点的影响,应结合研究区域特点进行创新型的优化改进,从而扩展 SWAT 模型应用场景和模拟精度。未来机器学习等算法与 SWAT 模型耦合建模可以在预测准确性方面得到显著的改进和提升。

4) 水文模型一直是人类活动和气候变化背景下研究水循环和生态环境的重要手段。气候变化和人类活动是当前水循环发生变化的主要的驱动因子。因此应用水文模型量化分析气候变化和人类活动对水文水资源的影响仍将是今后研究的重要方向。

5 结论

1) SWAT 模型的研究始于 1994 年,2006 年后与“SWAT 模型”研究主题相关论文数量快速增长,1994—2022 年期间在 SWAT 模型研究领域发表的论文共有 3 496 篇。2008 年以来中国发文数量迅速增长,在 2019 年超过了美国,成为全球对 SWAT 模型研究发文最多的国家。

2) 北京师范大学、德克萨斯农工大学、中国科学院大学、河海大学、武汉大学等是 SWAT 模型的重要研究机构。各国以及各研究机构之间对于 SWAT 模型的研究密切合作,极大地推动了这一领域全球化发展,为 SWAT 模型研究的发展起着重要推动作用。

3) SWAT 模型研究领域主要期刊有《JOURNAL OF HYDROLOGY》《HYDROLOGICAL PROCESSES》《WATER》等。最具影响力的国外发文作者是美国的 SRINIVASAN R 和 ARNOLD J G,国内发文作者是沈珍瑶、陈磊、欧阳威等。

4) SWAT 模型应用领域主要集中在水资源、环境科学与生态学等领域。国内外研究学者关于 SWAT 模型研究的热点主要聚焦于径流模拟、土地利用和气候变化对水文过程影响的评估、土壤侵蚀、污染负荷等方面。SWAT 模型研究的演变过程从发展阶段水文模拟的基础上过渡到非点源污染的模拟再到当前的人类活动和气候变化影响水循环问题。

5) SWAT 模型参数率定以及模型不确定性、不同流域尺度对于模型构建的影响、考虑多种应用情景下 SWAT 模型的优化改进、耦合机器学习算法提高模型精度、气候变化和人类活动对水循环及水汽

源的影响将成为未来 SWAT 模型的研究重点。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献：

- [1] 陈沛源, 李金文, 俞巧, 等. 基于 SWAT 模型的泾河流域地下水分布特征与水资源评价[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 102-109, 126.
- CHEN Peiyuan, LI Jinwen, YU Qiao, et al. Evaluating groundwater resource and its distribution in Jinghe Basin using the SWAT model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 102-109, 126.
- [2] 杨振华, 苏维词, 李威. 基于 PESBR 模型的岩溶地区城市水资源安全评价: 以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(5): 1-9.
- YANG Zhenhua, SU Weici, LI Wei. Safety assessment of urban water resources in Karst area based on PESBR model: A case study of Guiyang city[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2016, 34(5): 1-9.
- [3] 徐子萱, 郑华, 马金锋. 水文模型在生态系统水文服务评估中的应用综述[J/OL]. 水生态学杂志: 1-18[2023-12-28]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202212290515>.
- [4] 王丹, 吴琳娜, 冯紫微, 等. 1995 年以来贵州省土地利用变化对地表径流的影响研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(5): 44-55.
- WANG Dan, WU Linna, FENG Ziwei, et al. Study on the influence of land use change on surface runoff in Guizhou Province since 1995[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023, 41(5): 44-55.
- [5] 彭慧. 基于地理信息技术和 SWAT 模型的城市水资源评价方法研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(6): 686-693.
- PENG Hui. Urban water resources investigation based on geographic information technology and SWAT model[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(6): 686-693.
- [6] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [7] 杨凯杰, 吕昌河. SWAT 模型应用与不确定性综述[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 17-24, 31.
- YANG Kaijie, LYU Changhe. Reviews on application and uncertainty of SWAT model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 17-24, 31.
- [8] BRESSIANI D, GASSMAN P, FERNANDES J G, et al. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(3): 9-35.
- [9] TAN M L, GASSMAN P W, SRINIVASAN R, et al. A review of SWAT studies in Southeast Asia: Applications, challenges and future directions[J]. Water, 2019, 11(5): 914.
- [10] AKOKO G, LE T H, GOMI T, et al. A review of SWAT model application in Africa[J]. Water, 2021, 13(9): 1 313.
- [11] VAN GRIENSVEN A, NDOMBA P, YALEW S, et al. Critical review of SWAT applications in the upper Nile Basin countries[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3 371-3 381.
- [12] ALOUI S, MAZZONI A, ELOMRI A, et al. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean Catchments: Applications, feasibility, and future directions[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326: 116 799.
- [13] SAMIMI M, MIRCHI A, MORIASI D, et al. Modeling arid/semi-arid irrigated agricultural watersheds with SWAT: Applications, challenges, and solution strategies[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125 418.
- [14] WANG R Y, YUAN Y P, YEN H, et al. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns[J]. Science of the Total Environment, 2019, 669: 512-526.
- [15] AL KHOURY I, BOITHIAS L, LABAT D. A review of the application of the soil and water assessment tool (SWAT) in Karst watersheds[J]. Water, 2023, 15(5): 954.
- [16] FRANCESCONI W, SRINIVASAN R, PÉREZ-MIÑANA E, et al. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 625-636.
- [17] TAN M L, GASSMAN P W, YANG X Y, et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes[J]. Advances in Water Resources, 2020, 143: 103 662.
- [18] 张子石, 吴涛, 金义富. 基于 CiteSpace 的网络学习知识图谱分析[J]. 中国电化教育, 2015(8): 77-84.
- ZHANG Zishi, WU Tao, JIN Yifu. Cite space-based analysis of knowledge map on web-based learning[J]. China Educational Technology, 2015(8): 77-84.
- [19] PERIANES-RODRIGUEZ A, WALTMAN L, VAN ECK N J. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting[J]. Journal of Informetrics, 2016, 10(4): 1 178-1 195.
- [20] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [21] RUSYDIANA A S. Bibliometric analysis of journals, authors, and topics related to COVID-19 and Islamic finance listed in the Dimensions database by Biblioshiny[J]. Science Editing, 2021, 8(1): 72-78.
- [22] 刘智群, 李颖, 安凤妹. 科学计量指标在科研人员评价中应用[J]. 科技管理研究, 2011, 31(14): 72-75.
- LIU Zhiquan, LI Ying, AN Fengmei. Statistical analysis of papers on medical informatics in China[J]. Science and Technology Management Research, 2011, 31(14): 72-75.
- [23] 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.
- [24] 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): 1 491-1 508.
- [25] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1 211-1 250.
- [26] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/3/4): 413-430.
- [27] SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1 169-1 188.
- [28] MORIASI D N, GITAU M W, PAI N, et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(6): 1 763-1 785.
- [29] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 563-572.
- [30] ABBASPOUR K C, ROUHOLAHNEJAD E, VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 733-752.
- [31] LI Z, LIU W Z, ZHANG X C, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 35-42.
- [32] ABBASPOUR K C, FARAMARZI M, GHASEMI S S, et al. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran[J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): W10 434.

- [33] ONGLEY E D, ZHANG X L, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1 159-1 168.
- [34] ROSENTHAL W D, SRINIVASAN R, ARNOLD J G. Alternative river management using a linked GIS-hydrology model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(3): 783-790.
- [35] 新华社. 中国气象局评出 2006 年全球七大天气气候事件[EB/OL]. [2023-8-24]. https://www.gov.cn/govweb/jrzg/2007-01/02/content_485938.htm.
- [36] ZHANG X, SRINIVASAN R, HAO F. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 901-910.
- [37] 陈活波. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估[J]. *科学通报*, 2013, 58(8): 743-752.
- [38] ERCAN M B, MAGHAMI I, BOWES B D, et al. Estimating potential climate change effects on the upper Neuse watershed water balance using the SWAT model[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2020, 56(1): 53-67.
- [39] 黄存瑞, 刘起勇. IPCC AR6 报告解读: 气候变化与人类健康[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(4): 442-451.
HUANG Cunrui, LIU Qiyong. Interpretation of IPCC AR6 on climate change and human health[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(4): 442-451.
- [40] NTONA M M, BUSICO G, MASTROCICCO M, et al. Coupling SWAT and DPSIR models for groundwater management in Mediterranean Catchments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118 543.
- [41] GONG X Y, BIAN J M, WANG Y, et al. Evaluating and predicting the effects of land use changes on water quality using SWAT and CA-markov models[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(14): 4 923-4 938.
- [42] 李娜, 王修贵, 罗强, 等. 基于 SWAT 和 CLUE-S 模型的不同土地利用方式对排涝模数的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(2): 76-83.
LI Na, WANG Xiugui, LUO Qiang, et al. Using SWAT and CLUE-S models to evaluate the effect of land use on drainage modules[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(2): 76-83.
- [43] DOGAN F N, KARPUZCU M E. Modeling fate and transport of pesticides from dryland agriculture using SWAT model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 334: 117 457.
- [44] MOSBAHI M, BENABDALLAH S, BOUSSEMA M R. Assessment of soil erosion risk using SWAT model[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(10): 4 011-4 019.
- [45] MOSBAHI M, BENABDALLAH S. Assessment of land management practices on soil erosion using SWAT model in a Tunisian semi-arid catchment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 1 129-1 139.
- [46] SALHI C, TOUAIBIA B, ZEROUAL A, et al. Evaluation of soil erosion in Northern Algeria watershed using SWAT and RUSLE models[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(26): 11 559-11 589.
- [47] WANG Y, BRUBAKER K. Implementing a nonlinear groundwater module in the soil and water assessment tool (SWAT)[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(9): 3 388-3 403.
- [48] PALANISAMY B, WORKMAN S R. Hydrologic modeling of flow through sinkholes located in streambeds of cane Run stream, Kentucky[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(5): 04 014 066.
- [49] WANG Q R, LIU R M, MEN C, et al. Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 86-96.
- [50] JUNG C, AHN S, SHENG Z P, et al. Evaluate River water salinity in a semi-arid agricultural watershed by coupling ensemble machine learning technique with SWAT model[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2022, 58(6): 1 175-1 188.
- [51] YEN H, PARK S, ARNOLD J G, et al. IPEAT+: A built-In optimization and automatic calibration tool of SWAT+[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1 681.
- [52] 刘琨, 李梦杰, 吕振豫, 等. SWAT 模型在大尺度流域的应用探索[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(4): 35-38.
LIU Kun, LI Mengjie, LYU Zhenyu, et al. Application of SWAT model in large-scale watershed[J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(4): 35-38.
- [53] 侯文娟, 高江波, 戴尔卓, 等. 基于 SWAT 模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1 268-1 282.
HOU Wenjuan, GAO Jiangbo, DAI Erfu, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe Basin as the South source of Wujiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1 268-1 282.
- [54] CHEN L, CHEN S B, LI S A, et al. Temporal and spatial scaling effects of parameter sensitivity in relation to non-point source pollution simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 36-49.

Application and development of SWAT model: A bibliometric analysis

FENG Ziwei¹, WU Linna^{1,2,3*}, MU Tianbao¹, WANG Dan¹, ZHANG Guangying¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Public Big Data, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

Abstract: 【Objective】 SWAT is a model widely used to simulate various processes including hydrological processes and crop growth at various scales. This paper reviews its application and development from 1994 to 2022.

【Method】 The analysis is based on published papers that have been indexed by the Web of Science (WOS). Three bibliometric tools, VOSviewer, CiteSpace and Biblioshiny were used in econometric analysis of the literature. The levels of attention, knowledge and research frontiers in SWAT application and development were analyzed based on the number of published papers, publishing journals, affiliated institutions, paper citation, keywords and research topics. 【Result】 ① A total of 3 496 papers related to SWAT were published from 1994 to 2022. After 2006, the number of published papers involving SWAT increased rapidly. Since 2008, the number of SWAT papers published by Chinese researchers has grown rapidly, surpassing the United States in 2019 and becoming the lead country in publishing SWAT papers. ② The journals that publish SWAT papers most are "Journal of Hydrology",

"Hydrological Processes " and "Water ". Non-Chinese authors who published most SWAT papers are Srinivasan R and Arnold J, both from the United States. Chinese authors who published most SWAT papers are Shen Zhenyao, Chen Lei and Ouyang Wei. ③ Beijing Normal University, the University of Texas, the University of Chinese Academy of Sciences, Hohai University, Wuhan University are the institutions that contributed most SWAT papers. Cooperation between countries and research institutions has promoted globalization and development of SWAT. ④ The application of SWAT is mainly in water resources, environmental science, and ecology. ⑤ The hotspots in SWAT are runoff simulation, assessment of the impact of land use and climate change on hydrological processes, soil erosion, pollution load. **【Conclusion】** SWAT has been widely used in different areas but its practical application still has some challenges. These include parameter calibrations and the associated uncertainties, model construction for different watersheds as well as the influence of different factors, impact of climate change and human activities.

Key words: SWAT model; bibliometrix; knowledge map; hydrology; Web of Science

责任编辑：赵宇龙

(上接第 60 页)

Spatiotemporal temperature variation in soil in Wudaogou area and its modelling using the SARIMA model

JIANG Xinping¹, WANG Qimeng^{1,2*}, LIU Meng³, WANG Faxin³,
LYU Haishen¹, CHEN Yu¹, LI Jie¹, WANG Zhenlong³

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huaihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233000, China; 3. Anhui Province (Huaihe Commission, Ministry of Water Resources) Institute of Water Resources Science, Hefei 230088, China)

Abstract: 【Objective】 Soil temperature is not only important for hydrological processes but also plays an imperative role in crop growth and soil biochemical reactions. Understanding its spatiotemporal variation is crucial to improving soil and hydrological management. The purpose of this paper is to investigate the applicability of the SARIMA model to model spatiotemporal change in temperature across the entire soil profile. **【Method】** The study is based on temperatures measured from 1964 to 2022 across a 0-320 cm profile located at the Wudaogou Hydrological Experimental Station, in Anhui province, China. Linear regression, Sen's slope estimation, MK test and other methods are used to analyze the seasonal change in temperature in different soil layers, and to establish the SARIMA model. **【Result】** ① In spring and winter, the temperature in 0-160 cm soil layer had been in increase from 1964 to 2022 at significant levels. Except in the 0-10 cm soil, summer temperature in other soil layers had been in decrease from 1964 to 2022 at significant levels. In the fall, the temperature had been increasing in the 0 and 20 cm soil layer, but decreasing in other soil layers. ② The temperature in depths of 0, 10, 20, 40, and 160 cm had endured sudden drops in spring in 2006, 2013, 2012, 2015 and 2018, followed by significant increases. Since 1984, temperature in the 320 cm soil layer had begun to decrease significantly. ③ The correlation between measured and predicted temperature was >0.95. With the increase in soil depth, the correlation increases, MAE decreases from 1.666 to 0.390, and the RMSE decreases from 2.139 to 0.525. **【Conclusion】** The SARMA model is accurate to model spatiotemporal change in soil temperature across the entire 0-320 cm soil profile in Huaibei Plain area.

Key words: soil temperature; characteristics of change; time series; SARIMA model

责任编辑：白芳芳