

SWAT模型在水资源管理中研究进展与灌区应用展望^①

郑捷^{1,2}, 李光永^{1*}, 韩振中³, 孟国霞⁴, 邢黎明⁵

(1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2 北京市顺义区水务局, 北京 101300; 3 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 4 山西省水利水电科学研究院, 太原 030002; 5 山西省汾河水利管理局, 山西祁县 030900)

摘要: SWAT 模型是近几年发展比较快的一个流域分布式水文模型, 它可以对大、中尺度的流域的水文物理过程进行长时段模拟。本文介绍了 SWAT 模型的特点, 并通过对模型在反映人类活动对流域水资源管理影响等方面研究的评述, 总结了模型在自然流域水资源管理应用的优势以及在人工干扰强烈的农业灌区应用还存在的问题。进而提出了 SWAT 模型在灌区的水分循环、节水改造等方面的研究方向与应用前景, 为灌区水资源的优化管理与节水灌溉评价提供一个新的研究手段。

关键词: SWAT 模型; 水资源管理; 灌区

中图分类号: S274

分布式水文模型作为最有前景的流域水循环模拟方式, 近 30 年来得到了不断的发展^[1]。开发产生的各种分布式水文模型^[2-4], 既充分考虑了各种水文气象因素信息的时空分异特征, 也考虑了流域下垫面的时空变异特性, 但以往的应用研究多针对于自然水循环过程, 而流域水文循环越来越受自然和人类的双重作用, 水循环存在的介质与形式、水循环的驱动力都发生了变化, 这导致了水文循环规律的变化。

自然状态下的水循环系统是指没有人类活动干扰的水循环系统, 它是由大气降水、地表水、土壤水和地下水之间的“四水”转换过程构成的^[5]。相对于自然水循环系统, 人工的水循环系统是在人类的控制下进行的, 一般包括农业灌排系统、工业水循环系统、生活水循环系统等^[6], 尤其在农业灌区, 人工灌溉-蒸散过程成为最重要的水文过程, 与此同时, 工业、生活、生态等人工水循环系统在整个水循环机制中也处于不容忽视的地位。

美国农业部农业研究中心开发的 SWAT 模型^[7] (soil and water assessment tool) 是一个流域尺度的分布式水文模型, 用于模拟地表水和地下水水质和水量, 预测不同农业管理措施对各种土壤类型、土地利用方式和管理条件的大尺度复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质产量的影响。SWAT 模型自开发以来在加拿

大、澳大利亚、欧洲及亚洲部分地区自然流域水文过程模拟中得到了广泛的应用, 并在应用过程中得到了不断的发展, 但是在人工干扰强烈的流域尤其是农业灌区中的应用研究较少, 相关的工作经验积累还不太丰富, 还处于探索阶段。

本文旨在概述 SWAT 模型在国内外模拟人类活动对区域水量、水质平衡影响的研究动态, 并且归纳总结该模型在人工干扰复杂区域水资源管理应用中还存在的一些问题以及预测该模型在农业灌区应用的发展前景, 为模型更为广泛的应用提供参考价值。

1 SWAT 模型简介

SWAT 模型是一个具有物理机制、长时效、以日为时间步长的分布式水文模型, 它吸取了 CREAMS (chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems)、GLEAMS (groundwater loading effects on agricultural management systems)、EPIC (erosion-productivity impact calculator)、SWRRB (simulator for water resources in rural basins) 等模型的优点^[8], 该模型根据河网水系把流域分为若干个子流域 (subbasins), 每个子流域再根据相同的土地利用类型、土壤类型划分为若干个水文响应单元 (HRUs), 在每个 HRU 内采用各种参数模型计算水均衡中各个

①基金项目: 水利部公益性行业专项经费项目 (200701002) 和山西省水利科学技术项目资助。

* 通讯作者 (lgyl@cau.edu.cn)

作者简介: 郑捷 (1982—), 男, 江苏连云港人, 博士研究生, 主要从事灌溉排水理论与新技术研究。E-mail: zhengjiecau@126.com

分量, 再进行汇总, 最后求得流域的水量、水质的平衡关系。

SWAT 模型主要由水文过程模型、土壤侵蚀模型、污染负荷模型 3 个子模型构成, 3 个子模型由气象、陆面水文循环过程、农业化学物质及泥沙的运动、作物生长、农业管理活动、沟道过程、水库塘堰等水体过程等模块组成, 通过各模块的联合模拟运算, 对区域地表水、地下水水量和水质运移转化规律, 人类活动对水、沙、农业化学物质的长期影响进行评价。

SWAT 模型源代码公开, 模型的研发者每做修改后会公布新的源代码。最新的程序、源代码及程序文档可以在 SWAT 网站 (www.brc.tamus.edu/swat) 下载, 允许使用者针对自己研究区域对模型的源代码进行相应地修改。SWAT 模型从开发至今经历了 SWAT94、SWAT96 等数次改进, 对于历次的改进在《SWAT 理论文件》^[8]中已经详细介绍, 此处不作赘述。

2 SWAT 模型在水资源管理方面应用研究进展

SWAT 模型自开发以来在美国及欧洲等国家已经得到了广泛的应用, 其有效性已经得到多项研究项目证明 (如美国的 Coastal Watershed Assessment Of Gulf Of Maine 项目^[9]、RioGrande/RioBra 项目^[10]), 目前, SWAT 模型在流域水文模拟的适用性研究^[11-14]、流域的水土流失评价^[15-18]、变化输入参数下的水文响应研究^[19-21]等方面已十分广泛, 相关的研究进展国内不少研究者已进行了详细的介绍与阐述, 本文对此不再赘述。

2.1 人为改变土地利用方式下的水循环响应研究

人类活动对水循环的干扰作用最主要的表现为土地利用方式的变化对水循环的陆面过程的强烈影响。人类对土地的利用改变陆地表面的覆盖率、植物分布方式和土壤质地, 影响了原有的水循环状态, 从而改变流域的产汇流规律, 进而影响当地的地表、地下水资源量及其时空分布。土地利用变化或土地覆被变化 (land use/land cover change, 简称 LUCC) 是区域环境演变的重要组成部分, 近年来, LUCC 在区域尺度上的资源和环境效应被学术界广泛重视^[22-24]。LUCC 的重要环境效应之一是以水文、水循环效应出现的, LUCC 水文效应的研究, 早期大都采用试验的方法, 这种方法有利于揭示植被-土壤-大气相互作用的机理, 但难以在较大尺度上定量评估土地覆被变化的水文效应^[25]。SWAT 等分布式水文模型在流域水文循环中的应用, 为分析 LUCC 在整个流域尺度上的水文效

应提供了一个有效的手段。

Chanasky 等^[26]应用 SWAT 模型模拟了加拿大 3 个小流域分别对应 3 种放牧强度下 (无放牧, 放牧强度为每公顷土地每月 2.4 头牲畜、每公顷每月 4.8 头牲畜) 对地表径流的影响, 模拟结果表明无放牧情况下日径流量明显高于其他两种情况, 3 种放牧模式下的日径流量均低于日平均降雨量的 10%, 有融雪过程情况下, 融雪平均对日径流的贡献率 3 种放牧强度下分别为 78%、96% 和 92%。Celine 等^[27]应用 SWAT 模型成功地模拟了瓜的亚纳河上游流域由于人类活动而导致湿地干涸所产生的水文效应, 情景模拟结果表明: 取消玉米、甜菜等耗水量大的作物而改种葡萄的情况下, 地表径流将增加 8%。国内方面, 李道峰等^[28]为黄河河源区流域设置了 5 种土地覆被情景模型及 24 组不同气温和降水的情景组合, 研究气候变化、土地利用变化下的径流响应, 模拟结果表明: 随着植被覆盖度的增加, 流域年径流量减小, 蒸发量增加。当气温降低 2℃ 且降水增加 20% 时, 流域径流量增加 39.69%。陈军锋和陈秀万^[29]分析了梭磨河流域的气候变动和土地覆被变化对流域径流的影响, 结果表明, 20 世纪 60 年代至 90 年代, 梭磨河流域的径流变化中, 由气候波动引起的约占 3/5 ~ 4/5, 由土地覆被变化引起的约占 1/5。

2.2 地表水和地下水的调用对水循环转化影响研究

在人类的干预下, 地表径流和地下径流的方向发生了很大的变化, 水库和大量人工河流的兴建增加了地表水体的面积, 同时引导水分脱离自然河道对耕作土壤进行灌溉, 而含水层的开采也使本来需要长距离、长时间才能到达排泄区的地下水提前到达地表。Gosain 等^[30]应用 SWAT 模拟了印度 Pslleru 流域的灌溉回归水, 阐述了灌溉回归水的时空变异特点, 并模拟了实施渠道引水灌溉之后基流的变化, 结果发现基流量达到引水量的 50% 之多。评价了灌溉等人为活动对区域水量平衡的影响, 这一发现对水资源管理及规划具有重要意义。Sophocleous 等^[31]将 SWAT 模型与 MODFLOW 模型相耦合, 集总成 SWATMOD 模型, 对美国堪萨斯州中南部的响尾蛇河流域的地表水、地下水以及地表水与地下水的交换情况进行了模拟与评价。通过该流域 1955 年到 1994 年的径流与地下水位等数据对模型进行了校准与验证, 继而设定了一系列的管理措施, 包括降低抽水速度、改变引水模式等方案, 运用模型模拟流域未来 40 年 (1995—2034 年) 内地表径流、地下水位等变化情况。随后 Sophocleous 等^[32]详细介绍了 SWATMOD 模型的集成方法, 并且与传统的物理机制的分布式水文模型 SHE 模型和集总式的概

念型降雨-径流模型——斯坦福流域模型相比较,表明了该模型具有输入数据量小且易获取的特点,并且水文响应单元概念的提出易于模型进行流域空间差异性分析,增强了处理地表水与地下水交互作用、抽水井的分布、多种土地利用形式的灵活性。并以堪萨斯州 Rattlesnake Creek subbasin, Lower Republican River basin, Wet Walnut Creek basin 3个实例说明了该模型的实用性与多功能性。表明了该模型为流域评价土地利用变化、灌溉发展、气候变化等对地表径流与地下水资源的影响提供了有效的方法。

国内方面,王宏等^[33]集成了SWAT模型与GMS模型,对华北平原地下水系统进行联合模拟调参,根据最后调整的平均给水度值 0.165,计算出华北平原山前浅层区地下调蓄库容是 5.2~6.5 亿 m^3 ,结果表明:在华北平原启用地下水水库及修建人工漏水水库、生态河等必要的配套设施,具有一定的生态价值。

2.3 管理措施对水量平衡的影响研究

人工干扰下的流域水文循环的另一个显著特点是各种农业管理措施对复杂流域或区域的水、土和农业化学物质的产出定量影响。SWAT模型提供了模拟耕作系统、灌溉、施肥、农药等子模型。Behera和Panda^[34]运用SWAT模型研究了印度东部西孟加拉州的一个 973 hm^2 的农业流域内不同的耕作方式与施肥量对该流域产流、产沙及农业营养物质的定量影响,模拟结果表明,在该地区雨季内种植水稻比种植玉米产流、沙量分别少 5.9%、70.41%,为了降低产沙产污量,氮磷的施肥量保持在 80 kg/hm^2 : 60 kg/hm^2 最为合适。Arnold与Stockle^[35]运用SWRRB模型(SWAT模型前身)成功模拟了在田间修筑池塘或沟堤的情况下,漫灌对作物的产量的影响,并评价了田间修筑池塘或沟堤进行作物漫灌的经济效益,但模型并未考虑渠道输配水情况。

国内方面,焦锋等^[36]耦合了SWAT模型和马尔科夫链模型,对稻田灌溉的水分、养分循环进行了模拟,结果表明,水量模拟与实测误差平均为 5.01%,总磷模拟与实测误差 13%,悬浮物模拟与实测误差 7.3%,总氮误差较大,达 30%;继而通过马尔科夫链模型对土地利用的演化进行模拟,将结果带入SWAT模型,预测社会经济发展对水环境影响,结论表明:在保证稻田收获的前提下,可通过削减施肥量的方法来削减污染物输出,降雨和灌溉水量的变化会造成污染物输出的较大变化。胡远安等^[37]针对SWAT模型对水田在蓄水期的降雨-径流过程的模拟过于简单,难以体现不同时期的蓄水要求等问题,对水田蓄水的情况进行了修改,将水田划分为蓄水与非蓄水时期分别进行计算。

模拟结果表明:模型对长期径流量的模拟较为准确,而对短期径流的模拟精度较差。

2.4 农业灌区节水措施对灌溉水循环系统影响研究

科学的灌区水循环管理是实现灌区水资源高效利用,解决水资源危机的有效方法。为了实现灌区水资源的高效利用,人们开展了节水和水管理措施的研究。目前,田间尺度的节水灌溉技术研究已十分广泛,大面积推广节水灌溉也有许多实例,而节水措施的实施也会改变水循环的形成条件和转化规律,例如,渠系的衬砌减少了水量渗漏,入渗到土壤中的水量减少,包气带缺水量得不到有效补充,减少了入渗到地下水的水量;田间节水灌溉方式的实施,提高了田间水的利用效率,作物的无效蒸发减少,造成地表径流减少,相应的土壤入渗量也减少,与节水前相比,地下水由于得不到足够的入渗水量的补充,造成水位逐渐下降,从而改变了地下水与河道的补给关系。

针对灌溉农业系统中的小区和农田尺度的水分循环及其转化规律,国内外的学者做了大量的试验和模拟研究,在对田间尺度上灌溉、排水、降雨、蒸发蒸腾、渗漏、养分等和作物耗水、产量试验观测的基础上,进行了蒸发蒸腾、垂直渗漏、水平渗漏、根系吸水、排水等水分循环各要素的数值模拟。Droogers和Bastiaanssen^[38]在土耳其西部地区,针对某一渠灌系统,运用与SWAT结构类似的,针对田间尺度的“土壤-水-大气-植物整合模型SWAP”模拟了特定土壤类型、种植制度与灌溉制度下的作物实际ET值,并以遥感图像检测的ET值进行了校正,但仅对一个种植季度下作物的ET进行了模拟,并且研究尺度较小。周春华等^[39]运用SWAP对太行山山前平原田间土壤水分运动进行了数值模拟,运用实际观测资料与数值模拟结果进行了初步分析,论述了降雨灌溉入渗补给条件下土壤水分运动的规律。Odhiambo等^[40]提出了针对稻田的单个田块和田块链的水均衡模型,模型的输入参数包括灌溉供水、气象条件、土壤特性和田块尺寸,以此可以模拟蒸发蒸腾、渗漏、侧渗和地表径流过程。

在小尺度上水分循环各要素、作物产量、养分等因素应用常规的仪器和手段即可监测,得出结论比较可靠。但是由于自然条件的差异,灌区内地形地貌、水系分布、气象条件以及作物生长的时空变异性大,特定地理位置上的小尺度试验结果不能简单推广至大尺度区域。对于灌区等大尺度上的水分循环,难以通过传统的试验方法进行研究,需要借助于模型化的方法。而目前对灌区水循环模型研究主要采用水均衡的宏观统计模型,无法分析灌区内部复杂的自然因素、

工程条件、水管理措施的时空分布对灌区水文过程的影响。

利用先进的流域尺度分布式水文模型来回答各项节水措施对灌区水文循环的效应问题,国内外的研究成果较少,仅在美国, Santhi 等^[41]利用 SWAT 模型,并添加了渠系灌溉功能,模拟了德克萨斯州格兰德河灌区内的作物需水量和渠系用水效率,并对节水措施下的灌区内灌溉需水量与节水潜力进行了评价,其研究结果表明,改善农业管理措施、调整种植结构、提高渠系水利用效率 3 种节水措施下的节水潜力分别为 234.2、65.9、194.0 Mm³,改善田间农业管理措施的效果优于调整种植结构与提高渠系水利用效率。但文中仅模拟了渠系水的利用系数,并未考虑田间水利用系数、灌溉水利用系数,文中的节水措施未包括喷灌、微灌等节水灌溉工程措施。

3 存在的问题及在灌区应用研究展望

3.1 存在的问题

水文模型通常具有局限性, SWAT 模型的局限性不仅在于使用的数据库标准各国不一致,某些经验公式实际应用效果不理想等方面的不足,而且 SWAT 模型对人工干预复杂的区域,尤其是平原灌区的人工侧支水循环^[42-43]模拟研究有待改进。尽管当前的水文模型,特别是分布式模型的水分循环中,都考虑了灌溉措施,但灌溉对水分循环的影响不是模型的重点,绝大多数分布式水文模型灌溉功能相对不完善。

(1) SWAT 模型在平原区水循环模拟相对比较薄弱,对平原区的河流水系提取通常与实际出入较大,从而对合理的划分子流域产生影响;需要根据实际的河网渠系情况对研究区域(平原)的数字高程模型进行合适的修改。

(2) 灌区复杂的输配水渠系布置在 SWAT 模型中没有考虑, SWAT 等分布式水文模型是产汇流模型,渠道供水配水是逆汇流过程,渠道的输配水渗漏损失、蒸发损失模型目前无法计算,因此在灌区水循环模拟研究时需要添加渠系输配水的功能。

(3) SWAT 模型在计算出潜在腾发量后,在潜在腾发量的基础上计算实际蒸散发。实际蒸散发包括植物的蒸腾量、作物的冠层截留的蒸发量与土壤水分蒸发量,分开计算,但是该模型计算植被实际腾发量时仅考虑了潜在蒸散量和植被叶面积指数(LAI),以植被叶面积指数为指标将植被区分开,计算实际腾发量。这不适于灌区农田中不同作物实际腾发量的计算研究。

(4) 模型计算的地下水深度(水位高度)是离不透水层的高度。而在农田水利学中许多与地下水有关的计算,使用的都是地下水埋深,因此为了将模型应用在农田水利与地下水有关的计算中,需增加地下水埋深的计算。

(5) 灌区中不同节水措施(如喷灌、微灌、渠道防渗、农艺节水等)在 SWAT 等水文模型中无法体现,因此单纯运用 SWAT 模型无法模拟灌区内的节水模式对水循环转化的定量影响。

3.2 模型在灌区的应用展望

综上所述, SWAT 模型在自然流域内的水文循环、水资源管理中的应用十分广泛,但在人类活动强烈的农业灌区水文循环研究基本没有开展。目前对国内大型灌区的水文研究,在区域尺度上局限于水均衡的宏观统计模型^[44-45],在田间尺度上局限于有限的定位观测;缺少把地表水系统、地下水系统和田间定位观测有机结合的模拟分析工具^[46],而 SWAT 作为一个典型的开放式分布式水文模型,在不同尺度自然流域水文循环研究中有许多成功先例,这给模型研究灌区的水文循环过程提供了可能。

针对上述 SWAT 模型在农业灌区应用的难点与不足,充分考虑灌区内包括“取水-输水-用水-排水-回归”5 个环节构成的人工侧支循环过程^[47-48],对模型进行合理的修改与补充完善,例如增加灌区分布式输配水渠道渗漏损失计算、地下水埋深计算、农田作物耗水量及灌溉水利用系数计算等模块,建立针对特定灌区的人工-自然分布式水文模型,利用模型探讨灌区内的水分循环转化关系、节水改造模式下对水分循环强弱影响、灌区节水潜力等都是值得深入研究的课题方向,具体研究内容如下:

(1) 利用建立的灌区分布式水文模型模拟分析不同灌溉引水量变化条件下,灌区内渠道渗漏损失量、蒸发量,田间灌溉渗漏损失量、蒸腾蒸发量,灌区内地表水地下水转换关系,灌溉水的重复利用量等,探讨灌区灌溉水循环的特点。

(2) 利用模型计算分析渠系水利用系数、田间水利用系数、灌溉水利用系数、灌溉耗水百分比。模拟不同的节水模式,如不同的渠道防渗模式、田间灌水模式下,灌溉用水效率的变化关系,以及不同的节水改造投资对灌溉用水效率的影响关系。

(3) 确定合理的生态健康指标(主要指地下水位动态变化以不产生土壤次生盐碱化或干旱地区不影响自然植被生长为约束条件),通过不同节水措施下模型模拟与情景方案分析,确定不同节水模式下的地下

水位变化规律,建立地下水位与灌溉用水效率变化关系;确定灌区的技术经济平衡点,即减少可在灌区重复灌溉利用的灌溉损失量(渗漏、排水、退水)采取的相应措施的投资值等于该水量能被灌溉再利用(地下水抽取)需要的投资值,通过不同方案的情景分析,确定灌区达到技术经济平衡条件下的灌溉水利用系数,进而综合生态健康标准、技术经济平衡的约束条件,寻求灌区灌溉用水效率的合理阈值。

4 结语

SWAT模型自开发以来,以强大的功能、先进的模型结构以及高效的计算,在世界各国的流域水文水资源管理中得到了广泛而成功的应用。模型的物理机制、分布式等特点使得模型在描述人工干预下的灌区水分循环的时空变化提供了可能。而灌区的人工-自然复合型水循环体系与天然流域存在很大的区别,水文过程不再是以降水-产流机制为主,而是以工程灌溉-农田蒸腾蒸发为主。因此在灌区中的应用时需对模型相应模块进行必要的修改和补充。运用模型来模拟灌区内不同节水措施对灌溉水利用效率、地表水与地下水转换关系、节水效果等影响,为灌区水资源的优化管理与节水灌溉评价提供一个新的研究手段。

参考文献:

- [1] Smith MB, Georgakakos KP, Liang X. Preface the distributed model inter-comparison project (DMIP). *Journal Hydrology*, 2004, 298: 1-3
- [2] Abbott MB, Bathurst JC, Cunge, JA, O'Connell PE, Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, "SHE." 1: History and philosophy of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 1986a, 87: 45-59
- [3] Charbonneau R, Fortin JP, Morin G. The CEQUEAU model: Description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrological Science Bulletin*, 1977, 22(13): 193-202
- [4] Refsgard JC, Hansen E. A distributed groundwater/surface water model for the Susa-catchment. Part I. Model description. *Nordic Hydrology*, 1982, 13: 299-310
- [5] 谢新民, 张海庆, 尹明万. 水资源评价及可持续利用规划理论与实践. 黄河水利出版社, 2003, 8(1): 51-53
- [6] 裴源生, 赵勇, 陆垂裕, 秦长海, 张金萍. 经济生态系统广义水资源合理配置. 黄河水利出版社, 2006, 7(1): 45-46
- [7] Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89
- [8] Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Williams JR. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2002: 3-4
- [9] Percy P, Farrow D, Muttiah R, Srinivasan R. Development of Land-based Pollution Sources Inventory for the Gulf of Maine Regional Watershed. <http://www.brc.tamus.edu/srin/projects/noaa.html>. [1996-10-30]
- [10] Angela K, Ramanarayanan TS. Creation of a GIS to Model the Transport of Sediment and Toxic Materials in the Rio Grande/Rio Bravo International Watershed. <http://www.brc.tamus.edu/srin/projects/tmrcc.html>. [1996-6-30]
- [11] Arnold JG, Allen PM. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 1996, 176: 57-77
- [12] Eckhardt K, Arnold JG. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 2001, 251: 103-709
- [13] Fontane TA, Cruickshank TS, Arnold JG, Hotchkiss RH. Development of Snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 2002, 262: 209-223
- [14] Manguerra HB, Engel BA. Hydrologic parameterization of watershed for runoff prediction using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(5): 1149-1162
- [15] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, Rekolainen S, Bidoglio G. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model. *Ecological Modelling*, 2003, 169: 25-38
- [16] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, Bidoglio G. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 497-507
- [17] Qiu Z, Prato T. Economic evaluation of riparian buffers in an agricultural watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(3): 877-890
- [18] Qiu Z, Prato T. Physical determinants of economic value of riparian buffers in an agricultural watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(2): 295-303.
- [19] Bingner RL, Garbrecht J, Arnold JG, Srinivasan R. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1997, 40(5): 1329-1335
- [20] Fitzhugh TW, MacKay DS. Impacts of input parameter spatial

- [21] Jha M, Gassman PW, Secchi S, Gu R, Arnold JG. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 811-825
- [22] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 553-558
- [23] 摆万奇, 柏书琴. 土地利用和覆盖变化在全球变化研究中的地位和作用. *地域研究与开发*, 1999, 18(4): 13-16
- [24] 颀耀文, 陈发虎. 干旱区土地利用/土地覆盖变化与全球环境变化. *地域研究与开发*, 2002, 21(2): 22-23
- [25] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474-480
- [26] Chanasyk DS, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agricultural Water Management*, 2003, 59: 137-153
- [27] Celine C, Ghislain DM, Faycal B, Giovanni B. A long-term hydrological modeling of the Upper Guadiana (Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 193-200
- [28] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变换环境下分布式水文模拟. *地理学报*, 2004, 59(4): 563-573
- [29] 陈军锋, 陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在校磨河流域的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(2): 265-269
- [30] Cosain AK, Rao S, Srinivasan R. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru River Basin using SWAT model. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 673-682
- [31] Sophocleous MA, Koelliker JK, Govindaraju RS, Birdie T, Ramireddygar SR, Perkins SP. Integrated numerical modeling for basinwide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *Journal of Hydrology*, 1999, 214: 179-196
- [32] Sophocleous MA, Perkins SP. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *Journal of Hydrology*, 2000, 236: 185-201
- [33] 王宏, 姜华君, 田廷山, 朱远峰. SWAT/GMS 联合模型在华北平原地下水库研究中的应用. *世界地质*, 2005, 24(4): 368-372
- [34] Behera S, Panda RK. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 113: 62-72
- [35] Arnold JG, Stockle CO. Simulation of supplemental irrigation from on-farm ponds. *Irrigation and Drainage Eng.*, ASCE, 1991, 117: 408-424
- [36] 焦锋, 秦伯强, 黄文钰. 小流域水环境管理—以宜兴湖滄镇为例. *中国环境科学*, 2003, 23(2): 220-224
- [37] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟—以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 29-32
- [38] Droogers P, Bastiaanssen WG. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *Irrigation and Drainage Eng.* ASCE, 2002, 128: 11-18
- [39] 周春华, 何锦, 郭建青, 郑力. 降雨灌溉入渗条件下土壤水分运动的数值模拟. *中国农村水利水电*, 2007(3): 40-43
- [40] Odhiambo LO, Murty VVN. Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. I: Model. *Agricultural Water Management*, 1996, 30: 185-199
- [41] Santhi C, Muttiah RS, Arnold JG, Srinivasan R. A GIS-based regional planning tool for irrigation demand assessment and saving using SWAT. *American Society of Agricultural Engineers*, 2005, 48(1): 137-147
- [42] 陈家琦. 现代水文学发展的新阶段—水资源水文学. *自然资源学报*, 1986, 1(2): 46-53
- [43] 夏军. 华北地区水循环与水资源安全问题与挑战. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 517-524
- [44] 秦大庸, 于福亮, 裴源生. 宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟. *资源科学*, 2003, 25(6): 19-24
- [45] 赵勇, 裴源生, 张金萍. 宁夏平原区耗水量研究. *资源科学*, 2006, 28(4): 177-178
- [46] 王旭升, 杨金忠. 大型灌区陆地水循环模式的参数化方案: LWCMPS_ID. *地学前缘*, 2005(12): 139-141
- [47] 王浩, 王建华, 秦大庸, 贾仰文. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法. *水利学报*, 2006, 37(12): 1496-1501
- [48] 贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟 (I) —模型开发与验证. *水利学报*, 2006, 37(5): 534-541

Advance of SWAT Model in Regional Water Resource Management and Application Prospect in Irrigation District

ZHENG Jie^{1,2}, LI Guang-yong¹, HAN Zhen-zhong³, MENG Guo-xia⁴, XING Li-ming⁵

(1 College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China; 2 Shunyi Water Resources Bureau, Beijing 101300, China; 3 China Irrigation & Drainage Development Center, Beijing 100054, China; 4 Shanxi Institute of Water Resources and Hydropower Research, Taiyuan 030002, China; 5 Shanxi Bureau of Fenhe Water Conservancy Management, Qixian, Shanxi 030900, China)

Abstract: SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is an advanced, physically based and distributed hydrological model for watersheds, which has been developed rapidly in recently years. It is feasible to simulate hydrological and physical processes at the large and middle scale watersheds over long periods of time. This paper described the characteristics of SWAT model, summarized the advantages of the water resource management and application in natural watershed and the existent problems in irrigation districts with intensive artificial interferences after the comment on the researches of hydrological modeling and water resource management worldwide, and put forwards the research directions and application prospects of SWAT model on the water cycle of irrigation districts, water-saving reconstruction and other fields, and provided a new research tool for comment on water resource reasonable management and water-saving irrigation.

Key words: SWAT model, Water resources management, Irrigation district