

基于二元水循环的灌区分布式水文模型的应用研究

孟春红^{1,2,3}, 路振广^{1,2,3}, 马细霞⁴, 邱新强^{1,2,3}

(1. 河南省水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省节水灌溉工程技术研究中心, 河南 郑州 450003;

3. 河南省水利工程安全技术重点实验室, 河南 郑州 450003; 4. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 针对中国北方灌区的水文特点, 在二元水循环理论的指导下, 对自然流域水文模型 SWAT 进行了改进, 构建了灌区分布式水文模型, 改进了 SWAT 模型的灌溉水运动模块、稻田水分循环模块、稻田水量平衡各要素和产量模拟的计算方法, 增加了渠系渗漏模拟模块等。以河南省人民胜利渠灌区为例, 利用改进的 SWAT 模型对该灌区的水循环过程进行了模拟。为验证模型的有效性, 选用 Nash – Suttcliffe 效率系数(纳西效率系数) E 、线性回归系数 R^2 来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。结果表明: 该模型适合灌区水分循环的模拟。模型的构建和改进, 对分布式水文模型在高强度人类活动影响区域的水资源、水环境研究和管理起到积极的作用, 为灌溉水文学提供了新的研究方法。

关键词: 二元水循环理论; 分布式水文模型; 高强度人类活动; 灌区; 水量平衡

中图分类号: P334. 92 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)02-0092-06

Research on distributed hydrological model for irrigation area based on the theory of dual-cycling water resources

MENG Chunhong^{1,2,3}, LU Zhengguang^{1,2,3}, MA Xixia⁴, QIU Xinqiang^{1,2,3}

(1. Water Resources Research Institute of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 2. Center of

Efficient Irrigation Engineering and Technology Research of Henan Province, Zhengzhou 450003, China;

3. Key Laboratory of Safe Practice on Hydraulic Engineering of Henan Province, Zhengzhou 450003, China;

4. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Based on the theory of dual-cycling water resources, the irrigation water movement module, command loop of land phase of hydrological cycle, paddy field water balance module in SWAT model and the calculation method of rice yield were improved to establish a new distributed hydrological model on the basis of SWAT. The module of canal seepage was added to further improve the new model. The updated model was applied to analyze hydrological cycle for Renminshengli irrigation area in Henan Province. The model was calibrated and validated by E and R^2 . The result indicates that the improved SWAT model is well adapt to the simulation of water cycling. The improved model can be applied to water resources and water environment of the area with strong human activities, and a new method is supplied for irrigation hydrology.

Key words: theory of dual – cycling water resources; distributed hydrological model; strong human activities; irrigation area; water balance

1 研究背景

20 世纪 80 年代中期以来, 借助计算机技术和 GIS / RS 技术的不断发展, 分布式水文模型以能方便客观地反映气候和下垫面因子的空间分布不均匀性对流域降雨径流形成的影响, 逐渐成为现代流域水资源、水环境研究的重要工具和方法之一。其中,

SWAT 模型以强大的功能、先进的模型结构以及高效的计算, 并能在资料缺乏的地区建模, 在分布式水文模型中占有重要地位。SWAT 模型在北美和欧洲被广泛地应用, 并取得了较好的模拟结果^[1-4]; 在中国近年来也得到了应用, 如黄清华等^[5]、王中根等^[6]对西北寒旱区黑河流域水文过程的模拟, 郝芳华等^[7]对官厅水库进行了非点源的模拟, 张东等^[8]

收稿日期: 2013-02-20; 修稿日期: 2013-03-05

基金项目: 河南省重大公益项目(101100911100)

作者简介: 孟春红(1973-), 女, 湖北武汉人, 博士后, 高级工程师, 主要从事水资源开发利用与农业节水研究工作。

就模型气象发生器进行了改进和应用。总的来说,在国内外对 SWAT 模型的研究和应用大多集中在水资源自然循环方面,对人类活动的影响在模型的作用方面研究相对较少。

随着节水灌溉研究的不断深入,节水的尺度效应、节水潜力、节水型生态灌区等问题日益引起人们的关注。在这些问题的研究中,灌区的水量平衡及其转化的定量描述是关键。由于受人为活动特别是灌溉的影响较大,灌区水分循环过程十分复杂。田间试验可以准确获取水量平衡关系,然而对于灌区等大尺度的水分循环,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。而目前的灌区水文模型研究多为集总式的水平衡模型,无法分析灌区内部自然因素的时空分布和水管理措施对灌区水文过程的影响,水文学研究的分布式水文模型没有充分考虑灌区的水文特点。因此,针对灌区水文特点构建灌区分布式水文模型显得十分重要。

2 SWAT 模型水文循环原理

SWAT(Soil And Water Assessment Tool)是美国农业部开发的流域尺度的分布式水文模型,用于模拟、预测长期土地管理措施对于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响,SWAT 模型对径流和泥沙负荷的预测能力在美国已经得到广泛

验证。模型结合 GIS 平台,利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息,来模拟复杂流域中多种不同的水文物理过程,包括水的运动、泥沙的输移、植物的生长以及营养物质的迁移转化等^[9]。模型的整个模拟过程可以分为两个部分:子流域模块(产流和坡面汇流部分)和演算模块(河道汇流部分)。前者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,后者决定水、沙等物质从河网向流域出口的输移运动及负荷的演算汇总过程。子流域水文循环过程包括 8 个模块:水文过程、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、营养物质、杀虫剂和农业管理,模型中产流计算采用 SCS 径流曲线数方法(Modified SCS Curve Number Method),产沙计算采用修正通用土壤流失方程 MU-SLE(Modified Universal Soil Loss Equation)方法^[10]。SW - AT 采用先进的模块化设计思路,水循环的每一个环节对应一个子模块,十分方便模型的扩展和应用。根据研究目的,模型的诸多模块既可以单独运行,也可以组合其中几个模块运行模拟。

SWAT 对水文循环的模拟分为陆面和水面两个部分。陆面部分确定流向每个子流域内主河道的水量、泥沙量、营养成分及化学物质的各循环过程;而水面部分是和汇流相关的各水文循环过程,即水分、泥沙等物质从河网向流域出口的输移运动,除水量外,SWAT 还可以对河流及河床中化学物质的迁移转化进行模拟。其模型结构见图 1。

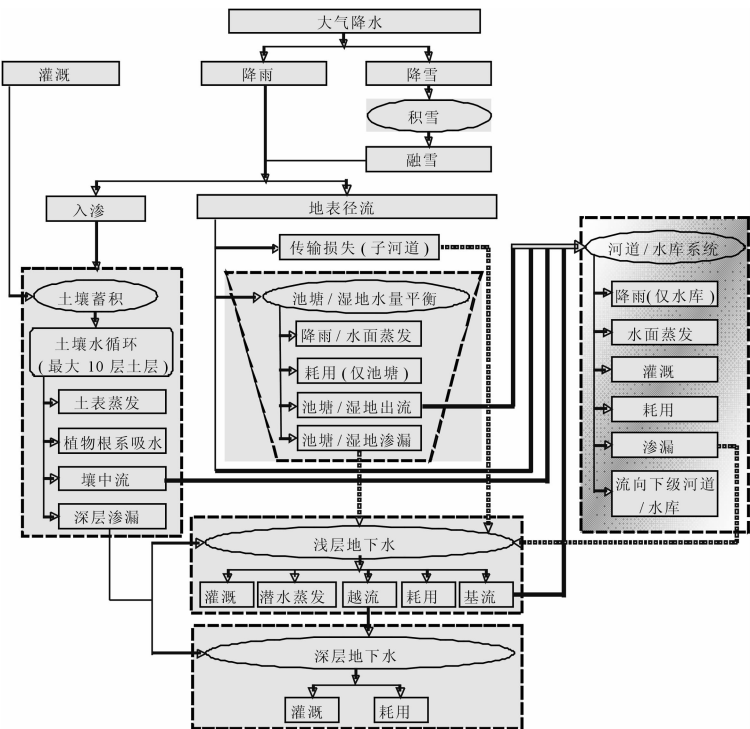


图 1 SWAT 模型结构示意图

3 模型的改进

从水循环过程来看,人类活动产生一系列次生效应改变了区域水循环系统输入输出条件,如区域内的水土保持措施、水资源开发利用、工农业生产、土地利用和城市化等,大范围改变了下垫面及微地貌类型与植被分布,使区域地表水的产汇流特性和地下水的补给排泄特性发生相应变化,也改变了地表水和地下水的转化路径;同时在天然水循环的大框架内,产生了“取水-输水-用水-排水-回归”的人工侧支循环圈^[11]。

本文在二元水循环理论的指导下,以 SWAT 模型为基础构建“自然-人工”二元水循环模型,并对其人工侧支水循环方面的模拟进行系统改进,使其能适应人类活动影响下区域二元水循环过程的模拟。以河南人民胜利渠灌区为例,针对中国北方平原水稻灌区特点,改进了 SWAT 模型的灌溉水运动模块、稻田水分循环模块、稻田水量平衡各要素和水稻产量的计算方法,改变了陆面水文过程的计算结构,增加了渠系渗漏模拟模块及其对地下水的补给作用等,构建了灌区分布式水文模型。

下面重点介绍对 SWAT 模型部分模块改进和增加的原因,以及修改的原理和方法。

3.1 灌溉水源的修改

原 SWAT 模型对农业管理方面考虑得比较全面,但在功能上还不能完全满足我国的实际情况,比如水田的蓄放水模块在进行年内多次放水设置时会产生错误、调水模块进行水库灌溉问题,在进行农业灌溉的年内或者年际之间只能为一种水源(水库、河道、浅层水、深层水、外流域水)等。

在制定水源时,参考当地的实际情况,在水资源相对短缺的地区,农业灌溉由于气象条件的时空变化和水资源的短缺,其灌溉水水源(水库、河道、浅层水、深层水、外流域水)在年内和年际之间可能是经常变化或者同时使用多种水源。为此,在灌溉水水源模块中增加了 1 个多水源灌溉组合模块,如果为一种水源则按照原模型进行运算,否则进入多水源子模块,由多水源组合模块进行年际年内的变化水源调水-供水运算,即在进行多年分布式模拟时可以在不同时段为灌溉指定不同的水源。

3.2 最大灌水量限制的修改

在原 SWAT 模型中,最大灌水量设定为使土体达到田间持水量时的含水量,即:

$$V_m = \text{Min}(S_{olfc}, V_{ma}) \quad (1)$$

式中: V_m 为实际灌水量, mm; S_{olfc} 为土体达到田间持水量时的含水量, mm; V_{ma} 为灌水量, mm。

这种限制适用于旱作地区,不适用于水稻,也难以准确地模拟稻田蓄水情况和不同灌溉模式下水分循环过程的变化。修改后的模型,最大灌水量上限为稻田最大蓄水深度 H_p , 即

$$V_m = \text{Min}(V_{ma}, H_p) \quad (2)$$

3.3 主沟道(排水沟)渗漏损失计算方法的改变

原 SWAT 主沟道(排水沟)的渗漏模拟与自然流域中的河流渗漏的计算方式一样, 即

$$rttlc = chk \cdot t \cdot L \cdot p \quad (3)$$

式中: $rttlc$ 为主沟道输水损失量, m^3 ; chk 为主沟道底部的导水率, mm/h ; t 为水流时间, h ; L 为主沟道长度, km ; p 为湿周, m 。

上式没有考虑地下水位对沟道渗漏损失的影响。而且原 SWAT 模型假定沟道渗漏损失补给的是深层地下水(承压水),而不是浅层地下水(潜水)。为了使模型更适合于灌区的特点,本文采用经验法计算排水沟的渗漏损失,并考虑地下水顶托对渗漏损失的影响,而且使主沟道的渗漏损失补给潜水。主沟道输水损失流量按下式计算:

$$Q_l = \sigma \cdot L \cdot Q_n \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{A}{100Q_n^m} \quad (5)$$

式中: Q_l 为沟道输水损失流量, m^3/s ; Q_n 为沟道净流量, m^3/s ; σ 为每公里沟道输水损失系数; A 为沟床土壤透水系数; m 为沟床土壤透水指数。

考虑地下水顶托修正后的渠道损失为:

$$Q'_l = \gamma \cdot Q_l \quad (6)$$

式中: Q'_l 为有地下水顶托影响的渠道损失流量, m^3/s ; γ 为地下水顶托修正系数。

3.4 稻田表面积计算方法的改变

稻田的表面积用来计算降落在田间的降雨量和蒸发、渗漏引起的田间水层损失。在原 SWAT 模型中,只有当水田的蓄水量大于 0 时,才能根据蓄水量大小计算表面积,并且稻田田块被假定为锥形的,即:

$$\begin{aligned} potsa &= pi \cdot (3.0 \cdot potvol / (pi \cdot slope))^{0.6666} \\ potvol &> 0 \\ potsa &= 0, \quad potvol \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $potsa$ 为稻田表面积, m^2 ; pi 为圆周率; $potvol$ 为稻田蓄水量, m^3 ; $slope$ 为稻田坡度。

然而,在研究区域,这种假定是不合理的。即使稻田蓄水为零,田块的表面积也是实际存在的,

同样可以接纳降雨量。因此,本文去掉了稻田接纳降雨的限制条件,改进了稻田表面积的计算方法,去掉了稻田为锥形的假设,即:

$$potsa = daha \cdot hruf r \quad (8)$$

式中: $daha$ 为研究区域面积, m^2 ; $hruf r$ 为稻田占研究区域面积的比例。

3.5 稻田有效降雨计算方法的改进

大尺度水分循环研究中,需要借助于遥感影像来获取稻田等土地利用方式的空间分布。由于精度问题,遥感图片未能分辨水稻田中渠道、道路以及田埂(为方便起见,以下通称田埂)的存在。为了反映田埂对水分循环的影响,本文根据典型区调查资料分析,取研究区域中的田埂面积占总面积的15%左右,改进了稻田有效降雨的计算方法。

降落在稻田田块里面的雨量直接蓄存在田间,降落在田埂上的降雨形成的径流流向排水沟和稻田,而田埂的径流、入渗量和稻田蓄水发生着复杂的水分交换,难以将其完全区分开来。因此,本文认为区域稻田有效降雨量是降雨量减去稻田田埂形成的流向排水沟那部分地表径流,即:

$$P_0 = P - P \cdot \beta \times 0.15 \quad (9)$$

式中: P_0 为有效降雨量, mm ; P 为降雨量, mm ; β 为稻田田埂降雨-径流(流向排水沟)系数。

3.6 稻田渗漏计算方法的改变

为了更准确地反映有犁底层存在情况的稻田渗漏特点,改进了稻田渗漏的计算方法。原 SWAT 模型中,水田蓄水层的渗漏量损失是蓄水层下层土体(第一层土壤)导水率、土体含水量的函数。即:

$$potsep = yy \cdot solk \cdot potsa \times 240 \quad (10)$$

式中: $potsep$ 为稻田渗漏量, m^3 ; yy 为最大渗漏量比例; $solk$ 为土体第1个土壤层的饱和导水率, mm/h ; $potsa$ 为稻田面积, hm^2 。

此计算方法不能反映稻田渗漏的复杂情况,而且会使稻田渗漏量的计算结果偏大。模型修改后,采用不同的方法计算稻田无水层时的自由排水通量和有水层时的稻田渗漏量,即:①生育期内无水层时稻田自由排水通量的计算,考虑各土层的土壤含水量、导水率,采用蓄满产流机制计算;②有水层时的稻田渗漏量受稻田土质、地下水位、稻田水深及田间管理措施等因素的影响,其值的变化在水稻生育期内较为复杂。为简化渗漏量计算,根据稻田渗漏观测资料并参考灌区土壤类型、水文地质等条件,取生育期内日最大加权平均渗漏强度为 2 mm/d 。

3.7 稻田蒸发蒸腾量计算方法的改进

在原 SWAT 模型中,稻田蒸发蒸腾的计算方法与非灌溉地的计算方法一样,而且设置了最大蒸发与最大蒸腾之和($ET_{\max}$)不大于参考作物腾发量 ET_0 的限制条件,即

$$ET_{\max} \leq ET_0 \quad (11)$$

根据农田水利及水稻节水灌溉的研究成果,稻田的蒸发蒸腾存在大于 ET_0 的情况。因此,改进了稻田蒸发蒸腾的计算方法,去掉了稻田蒸发蒸腾小于 ET_0 的限制条件。参考水稻作物系数 K_c 的研究成果,设置了不同生育期水稻最大蒸发蒸腾($ET_{\max}$)与 ET_0 之间的关系,即:

$$ET_{\max} = K_c \cdot ET_0 \quad (12)$$

3.8 稻田最大蓄水深度参数设置的改变

在原 SWAT 模型中,水田最大蓄水量的模拟采用的是近似于水体蓄水的方法,而且最大蓄水量(蓄水深度)是不变的。这种处理难以体现水稻生育期内不同时期蓄水深度变化的特点。根据灌区灌溉试验站提供的试验结果,确定了研究区域水稻不同生育阶段合理的最大蓄水深度。水稻各生育阶段的最大蓄水深度作为稻田排水的限制条件。水稻生育期内,当降雨量(或灌溉量、或降雨量与灌溉量之和)大于允许的最大蓄水深度时,多余水量形成田间排水。

4 改进后的模型在人民胜利渠灌区的应用

4.1 人民胜利渠灌区概况

人民胜利渠灌区位于河南省北部,跨新乡、焦作、安阳三市,涉及武陟、原阳、获嘉、新乡、延津、卫辉、滑县和新乡市郊区共七县一郊区。该灌区规划范围内土地面积为 1486.84 km^2 ,其中耕地为 9.923 万 hm^2 ,占总面积的 66.74% 。该灌区主要承担焦作、新乡、安阳三市8个县(市、区)的农田灌溉和新乡市城市供水、生态供水等任务,同时还承担向境外地下水补源的任务。灌区的灌溉系统由总干渠、干渠、支渠、斗渠、农渠五级固定渠道组成,目前骨干渠道总长 1859.93 km (其中总干渠长 52.7 km),有建筑物约 5100 座。

人民胜利渠灌区自1952年4月开灌以来,经过近六十年的建设与管理,已逐步形成“井渠结合”的灌溉网络和干、支、斗齐全的排水体系,成为当地工农业经济可持续发展的基础。

人民胜利渠灌区实行灌排分设的渠系布置,灌区主要排水渠系有:卫河、东孟姜女河、西孟姜女河、

总干渠、南长虹渠、西柳青河和文岩渠。其中,东孟姜女河位于灌区东部,是灌区的一条骨干排水河道;自东三千小河渡槽起向东北方向至卫辉市东入卫河,全长为 33.78 km,流域面积为 382.5 km²,河底在地面以下 3~4 m;治理标准为 5 年一遇,排涝流量为 52.8 m³/s,排地下水流量为 2.07 m³/s。

4.2 运行模型

模型运行所需的基本图件包括数字高程图、水系图、土地利用图和土壤分布图。本文使用的数字高程图精度为 90 m;在 ERDAS 软件里采用非监督分类方法,从两景 LandSat TM(分辨率为 30 m)和 LandSat ETM(分辨率为 15 m)遥感影像的叠加影像中提取土地利用图;土壤分布图由人民胜利渠灌区提供。模型运行的主要输入参数包括研究区域的气象数据、地形属性、土壤性质、植被参数和管理措施,其中管理措施包括灌水时间、灌水量、作物种植时间、收割时间等。从研究区域内的灌溉试验站获得气象资料(包括降水、气温、风速、太阳辐射量和相对湿度)。通过试验和调查获得区域内各土壤类型不同土层的土壤理化性质;水稻的生长参数由田间试验资料获得,其它植被类型的生长参数由调查获得。

4.2.1 模型适用性的评价标准 为验证模型的有效性,本文选用 Nash-Suttcliffe 效率系数(纳西效率系数) E 、线性回归系数 R^2 来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。

(1) Nash-Sutcliffe 效率系数 E 。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2}$$

(13)

式中: Q_0 为实测值; Q_p 为模拟值; Q_{avg} 为实测平均值; n 为实测数据个数。当 $Q_0 = Q_p$ 时, $E = 1$;如果 E 为负值,说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度更低。据以往模型的模拟经验,当 $E > 0.75$ 时,可认为模拟效果好;当 $0.36 < E < 0.75$ 时,模拟效果令人满意;当 $E < 0.36$ 时,模拟效果不好。

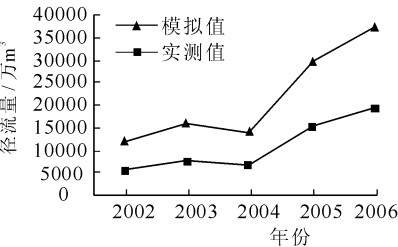


图2 东孟姜女河率定期年径流量模拟值与实测值对比图

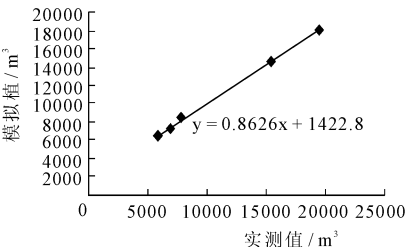


图3 东孟姜女河率定期年径流量模拟值与实测值相关图

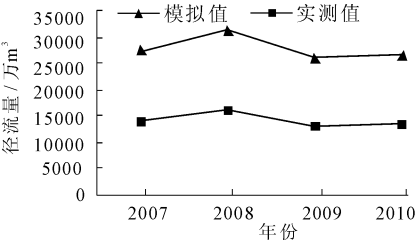


图4 东孟姜女河验证期年径流量模拟值与实测值对比图

(2) 相关系数 R^2 。相关系数 R^2 的计算可在 Microsoft-Excel 中应用线性回归函数求得,其值的大小是模拟值与实测值间相关程度的一个评价标准,当 $R^2 = 1$ 时,表示相关性非常好;当 $R^2 < 1$ 时,其值越小,表示其相关性越差,即模拟值与实测值的吻合程度越不令人满意。

4.2.2 模型参数敏感性分析 在 SWAT 模型中,必须对各参数进行敏感性分析,这一步骤是判定某一参数对计算结果的影响程度的基础,以此选择敏感性较大的参数来进行模型的参数率定,既可增加率定的准确性和率定的针对性,又可减少模型率定阶段的消耗时间。在分布式水文模型中,存在着大量的参数,在文中选择摩尔斯分类筛选法来进行参数敏感性分析,由此针对地表径流模拟的参数敏感性建立参数基础数据集,见表 1。

表1 径流模拟调节参数表

校准参数	参数含义
USLE_C	陆地植被所应用的水土流失 C 因子的最小值
SMFMX	6 月 21 日的融雪因子
SMFMN	12 月 21 日的融雪因子
ALPHA_BF	基流消退系数 α
GWQMN	发生回流所要求的浅层地下水的阈值深度
GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数
REVAPMN	浅层地下水再蒸发的阈值深度
ESCO	土壤蒸发补偿系数
SLOPE	平均边坡坡度
SLSUBBSN	平均坡长
CN	湿润条件 II 下的 SCS 径流曲线数
SOL_AWC	土壤可利用水量

4.2.3 模拟效果评价

(1) 年径流量模拟结果与评价。根据模型参数率定与验证对数据的要求,选用 2002-2006 年东孟姜女站的径流数据进行参数率定,并采用参数率定过程中最终得到的参数,应用 2007-2010 年的实测数据进行模型验证。图 2、图 3 分别是东孟姜女河率定期年径流量模拟值与实测值对比图和相关图。

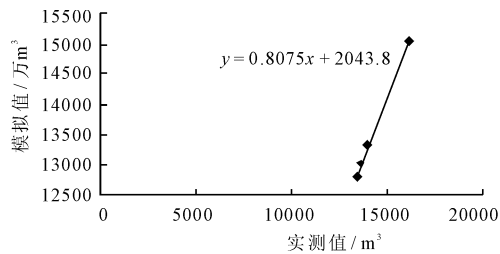


图 5 东孟姜女河验证期年径流量模拟值与实测值相关图

图 4、图 5 分别是东孟姜女河验证期年径流量模拟值与实测值对比图和相关图。

(2)水稻产量模拟与评价。为了检验建立的模型能否模拟灌区的水分循环过程、修改的模块是否正确、以及模型参数是否合理,采用人民胜利渠灌区 2007、2008、2009 和 2010 四年水稻全生育期的数据对模型进行率定和验证。其中 2007 年和 2008 年的数据用于模型率定,2009 年和 2010 年的数据用于模型检验。

本文中的土壤有效水含量是根据土壤普查资料和试验数据确定的,不需校正。而且,由于本文改进了稻田的水分循环模块,稻田的产流计算过程与旱作物的产流计算过程不同,不需校正稻田的 CN_2 值,因此只需校正旱作及林地的 CN_2 和土壤蒸发补偿系数 $ESCO$ 、作物吸水补偿系数 $ESPO$,以及稻田的土壤蒸发补偿系数、作物吸水补偿系数。

选用相对误差(RE)来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。选用 2007、2008 年的产流数据对模型进行校准,选用 2009、2010 年的数据对模型进行验证。水稻产量校准和验证结果,见表 2。校正期和验证期的模拟效率评价指标结果表明,构建的模型在研究区域取得了较好的模拟结果,构建的灌区分布式水文模型适合于豫北灌区水分循环及水稻产量的模拟。灌区分布式水文模型的构建,为灌溉水文学提供了新的研究方法。

表 2 水稻产量校准和验证结果 $kg/hm^2, \%$

项目	年份	实测值	模拟值	RE
校准	2007	7515	7380	-1.8
	2008	7020	7335	4.5
验证	2009	7770	7665	-1.4
	2010	7620	7515	-1.4

5 结 语

根据中国北方灌区水文特点,在对自然流域水文模型 SWAT 改进的基础上,构建了灌区分布式水文模型,对灌区分布式水文模型构建的关键性问题进行了有效地探讨。以人民胜利渠灌区为例,对改进的 SWAT 模型进行校准和验证。结果表明,构建的灌区分布式水文模型适合于北方灌区水分循环及水稻产量的模拟。灌区分布式水文模型的构建,为灌溉水文学提供了新的研究方法。

参考文献

[1] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development[J]. J. Am. Water Resour. Assoc, 1998,34(1):73 - 89.

[2] Conan C, de Marsily G, Bouraoui F, et al. A longterm hydrological modeling of Lhe upper Cuadiana river basin (Spain)[J]. Phys. Chem. Earth, 2003,28(4 - 5):193 - 200.

[3] Bosch D D, Sheridan J M, Batten H L, et al. Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2004, 47(5),1493 - 1506.

[4] Chanasyk D S, Mapfumo E, Williams W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003,59: 137 - 153.

[5] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):22 - 26.

[6] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1):79 - 86.

[7] 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(2):385 - 386.

[8] 张 东,张万昌,朱 利. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J]. 地理科学,2005,25(4):434 - 440.

[9] DiLuzio M, Srinivasan R, Arnold J C, et al. ArcView interface for SWAT2000, User's Guide[M]. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2002.

[10] 贾仰文,王 浩,倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

[11] 王 浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报,2002,33(8):1 - 7.