

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0163

李文晖, 邵东国, 徐保利, 等. 灌排系统水转化模拟模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 130-141. LI W H, SHAO D G, XU B L, et al. Study of water transformation simulation model of irrigation and drainage system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 130-141. (in Chinese)

灌排系统水转化模拟模型研究

李文晖, 邵东国, 徐保利, 胡能杰, 杨霞

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 受自然与人为因素综合影响, 灌区水转化过程复杂多变。以湖北漳河水库灌区为例, 分别从水平和垂直方向描述典型灌排系统的水转化过程, 以水量平衡原理为基础, 研发灌排系统边界处置、稻作区田间多层土壤、塘坝及排水沟道之间多个水转化模拟子模块, 由此构建一种客观描述灌排系统边界半封闭结构及其水平输送、垂直运动与渠-田-沟-塘水转化过程的耦合模拟模型, 解决了应用流域分布式水文模型求解灌区水转化过程中面临的灌区边界不确定、分层土壤简化处理等问题。利用漳河灌区谭店灌排系统 2014-2015 年水平衡测试观测数据对该模型进行检验, 采用拉丁超立方抽样法对模型参数进行分层抽样, 并利用偏相关法分析参数敏感性。通过模型计算可得, 支沟率定期和验证期模拟结果的复相关系数分别为 0.83、0.70, *Ens* 系数分别为 0.81、0.68, 斗沟率定期和验证期模拟结果的复相关系数分别为 0.79、0.68, *Ens* 系数分别为 0.73、0.62, 结果表明该模型适用于灌排系统水转化过程模拟。与 SWAT 模型对比, 对于同一研究区域, 复相关系数由 0.11 提高到 0.73, *Ens* 系数由 -0.71 提高到 0.70, 进一步验证了该模型的先进性, 为灌排系统尺度水转化模拟和机制研究提供了新方法。

关键词: 灌排系统; 水转化; 模型; 拉丁超立方; 偏相关; 敏感性分析; SWAT 模型

中图分类号: S27 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of water transformation simulation model of irrigation and drainage system

LI Wenhui, SHAO Dongguo, XU Baoli, HU Nengjie, YANG Xia

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The process of water transformation in irrigation areas is complicated due to the influence of natural and artificial factors. Taking the irrigation area of Zhanghe Reservoir in Hubei Province as a case study, we described the water transformation process of a typical irrigation and drainage system from both vertical and horizontal perspectives. Based on the principle of water balance, we established a simulation model that was composed of multiple modules for boundary treatment and simulation of the water transformation between multiple soil layers of the rice field, ponds and ditches. The model was calibrated and verified based on the data of Tandian irrigation and drainage system in Zhanghe district from 2014 to 2015. After sampling the model parameters using Latin hypercube, we conducted sensitivity analysis of the parameters using partial correlation analysis. The model calculation showed that the multiple correlation coefficients of the simulation results for the branch ditches in calibration and validation periods were 0.83 and 0.70 respectively, and the *Ens* coefficients were 0.81 and 0.68 respectively; the multiple correlation coefficients of the simulation results for the tertiary ditches in calibration and validation periods were 0.79 and 0.68, and the *Ens* coefficients were 0.73 and 0.62 respectively. The results indicate that the model is suitable for water transformation process simulation in irrigation and drainage systems. Compared with the SWAT model, for the same study area, the multiple correlation coefficient increased from 0.11 to 0.73, and the *Ens* coefficient increased from -0.71 to 0.70, further verifying the advanced nature of the model, and providing a new method for water transformation simulation and mechanism research at the irrigation and drainage system scale.

收稿日期: 2018-07-30 修回日期: 2018-09-27 网络出版时间: 2018-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181016.0934.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51439006);“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0400101)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51439006); National Key R&D Program of China during the 13th Five year Plan Period (2016YFC0400101)

作者简介: 李文晖(1994), 男(土家族), 湖北巴东人, 博士研究生, 主要从事水资源高效利用与环境保护研究。E-mail: 2012301580121@whu.edu.cn

通讯作者: 邵东国(1964), 男, 湖南常德人, 教授, 博士, 主要从事水资源高效利用及其生态环境效应研究。E-mail: dgshao@whu.edu.cn

0.62, indicating that the model was suitable for simulating the water transformation process of irrigation and drainage systems. As compared with the SWAT model, for the same study area, the proposed model improved the multiple correlation coefficient from 0.11 to 0.73 and the Ens coefficient from -0.71 to 0.70, proving the proposed model was superior to the SWAT model. This study provided valuable information for the study of water transformation in irrigation and drainage systems.

Key words: irrigation and drainage system; water transformation; model; Latin hypercube; partial correlation; sensitivity analysis; SWAT model

受地形地貌、水文地质、土壤作物、农业水利工程等因素综合影响,灌排系统结构复杂多样,既存在水平灌溉渠系、排水沟系及其与农田、塘坝等之间的水量输送,也有灌溉水量在田间作物、土壤乃至地下水等之间的垂直运动。为揭示农田到灌区水转化机制,国内外开展大量的灌排试验研究,提出了许多灌区水文过程模拟模型与水平衡机制^[1-6],这些都对揭示灌区水转化过程,促进农业水资源高效利用,保障粮食安全具有重要意义^[7-9]。

现有描述灌区水文过程的模型大多依赖于国外流域分布式水文模型,根据灌区实际条件进行适当的改进,如代俊峰等^[10-11]结合中国南方丘陵水稻灌区水文特点,改进 SWAT 模型中的稻田水分循环模块,改变其陆地水文过程计算结构,增加地下水补给作用和塘坝灌溉模块等,构建了适应于水稻灌区水分循环模拟的灌区分布式水文模型。也有部分学者考虑到灌溉渠道、排水沟和人工河道等人为干扰,在沟渠河网的提取方法、子流域划分等方面进行了改进^[12-16],但受灌排系统分布等影响,灌区并不像流域一样具有明显的分水岭,边界的刻画一直是灌区水文模型研究中的一大难题,至今没有解决。

此外,多层土壤间的水分运动也是灌区水文过程的重要组成部分。为揭示不同土层间的水分运动规律,国内外做了大量试验及模拟研究^[17],如甘永德等^[18]为探明降雨条件下分层土壤入渗特性,通过室内模拟降雨入渗试验,研究了不同分层组合方式对土壤入渗特性的影响。Yangwen JIA 等^[19]为揭示非稳定降雨条件下多层土壤间的入渗规律,将 Greer Ampt 模型推广到多层土壤的入渗模拟,并与基于 Richards 方程构建的数值模型模拟结果进行对比,两者模拟结果较为一致,进一步验证了所构建的广义 Greer Ampt 模型的适用性。但如何考虑多层土壤间的水分运动及其对灌区水转化过程的影响,尚有待进一步探究。

考虑到灌区是由多个结构基本相似的灌排系统组成的复杂系统,在自然地理条件基本相似灌区,不同灌排系统之间也存在水转化过程的相似性。本文以灌排系统为研究尺度,重点探讨灌排系统复杂边

界条件及多层土壤对灌区水转化过程影响问题,研发灌排系统边界处置、稻作区田间多层土壤、塘坝及排水沟道之间多个水转化模块,构建了一种新的灌排系统水转化(Water Transformation of Irrigation and Drainage System,以下简称 WTIDS)模型,为客观、精细化模拟灌区水转化过程提供了新方法。

1 WTIDS 模型构建

1.1 灌排系统水转化模型概化

灌排系统一般由水源、水源工程、灌溉渠系、排水沟系、各类田间工程、渠系建筑物以及容泄区组成,其平面概化示意图见图 1。A、B 为灌溉渠系,C 为排水沟系。水经各级渠道进入田间,多余水量排入沟道,部分塘坝与渠道沟道相连,发挥调蓄作用。

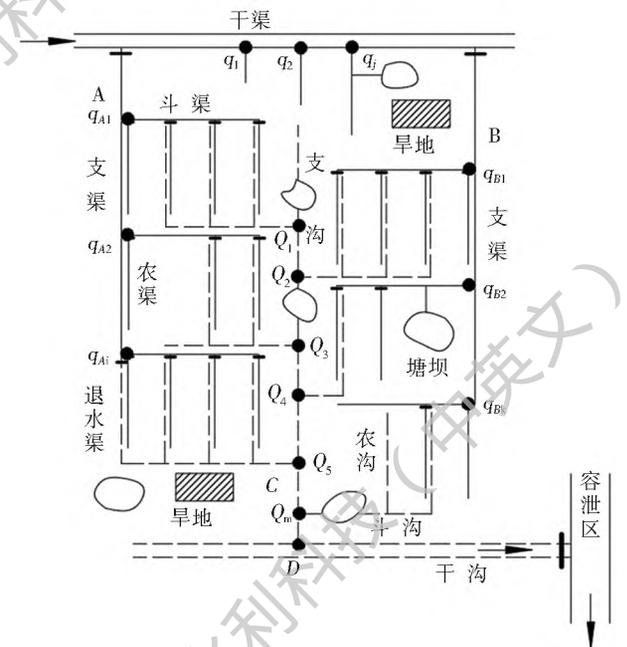


图 1 灌排系统平面概化示意图

Fig. 1 Sketch of the irrigation and drainage system

垂向上,灌排系统水转化过程分层从上至下可分为大气层、作物层、土壤层以及地下水层,具体如图 2 所示。水通过降雨至田间,同时蒸发散失至大气层。水分在各层土壤间运动,部分流出底层土壤剖面补给地下水,地下水也会以毛管上升水形式补充土壤水。

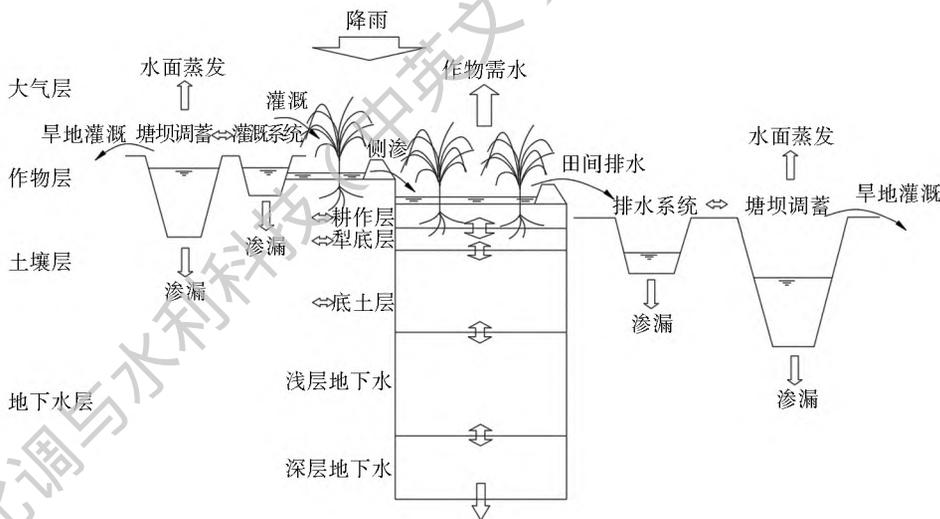


图 2 灌排系统水转化过程垂向概化示意图

Fig. 2 Vertical diagram of water transformation in the irrigation and drainage system

灌排系统区别于自然流域十分重要的一点,即自然流域拥有明确且闭合的分水岭脊线作为流域边界,边界上无水量交换过程,而灌排系统的边界通常为渠道沟道、堤防或是公路,由于边界上分布有渠道或是沟道岔口,灌排系统边界上存在水量输入点。灌排系统边界输入有三种形式:(1)典型灌溉渠系按“干一支一斗一农一毛”五级渠道划分,从水源引水进入干渠,经过各级渠道最终通过毛渠将水输入田间,本模型将斗渠进水口作为控制点,编号为*i*(*i*=1, 2, 3, ..., *n*₁),记流量为 q_{Ai} ;(2)实际生活中灌溉渠系和排水沟系的布置会根据区域的地形地貌进行调整,存在直接从干渠引水进行田间灌溉的岔口,编号为*j*(*j*=1, 2, 3, ..., *n*₂),记流量为 q_j ;(3)一般灌排系统为一套灌溉渠系和排水沟系相互配合布置,但存在两套灌溉渠系共用一套排水沟系的情况,如图 1 所示,B 灌溉渠系斗渠进水口控制点编号为 *k*(*k*=1, 2, 3, ..., *n*₃),记流量为 q_{Bk} 。则整个灌排系统的灌溉水量为

$$W = \sum_{i=1}^{n_1} q_{Ai} + \sum_{j=1}^{n_2} q_j + \sum_{k=1}^{n_3} q_{Bk} \quad (1)$$

田间排水通过农沟汇入斗沟,进而汇入支沟、干沟排入容泄区,以斗沟与支沟的交汇口为控制点,编号为 *m*(*m*=1, 2, 3, ..., *n*),记流量为 Q_m ,并在两控制点间采用水量平衡原理,可计算出支沟排水口的径流量。

则灌排系统水平衡方程为

$$SW_t = SW_{t-1} + P_t - D_t - E_t - DP_t + \Delta W_{pond,t} \quad (2)$$

式中: SW_t 、 SW_{t-1} 分别表示第 *t* 天和第 *t*-1 天的土壤储水量(mm);*t* 表示时间(d); P_t 表示第 *t* 天的降雨量(mm); W_t 表示第 *t* 天的灌溉水量(mm); D_t 表示第 *t* 天的排水量(mm); E_t 表示第 *t* 天的蒸散发量

(mm); DP_t 表示第 *t* 天从土壤剖面底部渗出的水量(mm); $\Delta W_{pond,t}$ 表示第 *t* 天灌排系统内塘坝蓄水量变化量(mm)。部分地表径流进入排水沟道流出灌排系统,另一部分地表径流则进入附近塘坝,积蓄于塘坝内。

灌排系统水文过程受道路、堤防或渠沟分布等人为因素影响巨大,在划定灌排系统边界时须考虑这些人为因素的影响。灌排系统中,衬砌的渠道起到了隔绝水流传输的作用,公路、铁路以及堤防在设计及建设过程中也会将路基压实垫高,这与自然的分水岭功能类似,因此,可以将公路、铁路、堤防或是衬砌后的渠系作为定义灌排系统边界范围的依据。子流域划分同样以此为原则,以衬砌的规模较小的渠系,如支渠或斗渠,结合公路、铁路及堤防的分布作为子流域边界划分的依据,并将子流域作为模型水文计算的最小单元。

为了满足实际灌溉需求,干渠或分干渠沿线往往设置诸多分水岔口,直接引水灌溉农田,本模型考虑边界上水量点输入对灌排系统水转化过程的影响,在定义子流域的基础上,结合实地观测数据,将某个子流域边界上的若干输入点的流量进行累加,使之等效为一个输入点,流量记为 W_i (*i*为子流域编号)。

模型分别模拟估算各子流域的径流量,然后通过排水沟道演算过程得到整个灌排系统的总径流量。

1.2 灌排系统水转化过程描述

1.2.1 田间水转化

本模型定义田间储水深度,即土壤耕作层储水量与田间淹没水层的水量之和,并以田间储水深度

作为状态变量,根据水量平衡方程,建立其与各输入输出变量间的田间水平衡方程,方程表示为:

$$S_t = S_{t-1} + P_t + IR_t + CR_t - ET_{\text{plant},t} - ET_{z_j,t} - DP_t \quad (3)$$

式中: S_{t-1} 、 S_t 分别为第 $t-1$ 天和第 t 天的田间储水深度; P_t 为第 t 天降雨量; IR_t 为第 t 天灌溉量; CR_t 为第 t 天补充耕作层的毛管水上升量; $ET_{\text{plant},t}$ 为第 t 天耕作层作物根系吸水量; $ET_{z_j,t}$ 为第 t 天株间蒸发量; DP_t 为第 t 天渗漏至犁底层的水量。以上各变量单位均为 mm。

(1) 田间排水量。

$$DR_t = \begin{cases} S_t - \theta_{\text{sat},1} \cdot h_{\text{soil},1} - H_{p,k} & S_t - \theta_{\text{sat},1} \cdot h_{\text{soil},1} \geq H_{p,k} \\ 0 & S_t - \theta_{\text{sat},1} \cdot h_{\text{soil},1} < H_{p,k} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_t 为第 t 天田间储水深度(mm); $\theta_{\text{sat},1}$ 为耕作层土壤体积饱和和含水率; $h_{\text{soil},1}$ 为耕作层厚度(mm); $H_{p,k}$ 为水稻第 k 个生育阶段对应的田间最大蓄水深度(mm)。对于水田,仅当田间淹没水层超过最大蓄水深度时,才会通过排水孔进行排水,假设水田排水全部流入排水沟。

(2) 植株蒸腾量与株间蒸发量。

植株蒸腾量与株间蒸发量合称作物需水量,本模型采用国内常用的作物系数法计算作物实际需水量^[20],计算方法为

$$ET_t = k_c \cdot ET_{0t} = ET_{\text{plant},t} + ET_{z_j,t} \quad (5)$$

式中: ET_t 为第 t 天的作物实际需水量(mm); k_c 为作物系数,无量纲; ET_{0t} 为第 t 天参考作物需水量(mm); $ET_{\text{plant},t}$ 为第 t 天水稻植株蒸腾水量(mm); $ET_{z_j,t}$ 为第 t 天水稻株间蒸发水量。

植株蒸腾的水分来源于作物根系吸水,由于水稻根系层深度一般大于耕作层厚度(20 cm),因此水稻蒸腾水量须在不同土层间进行分配,根据相关研究^[20],水稻根系吸水总量 $ET_{\text{plant},t}$ 可以表示为

$$ET_{\text{plant}} = \int_0^{L_r} ET_{\text{plant}} \left(\frac{1.8}{L_r} - \frac{1.6}{L_r^2} z \right) dz \quad (6)$$

式中: z 为根系深度(m); L_r 为水稻有效根层的深度(m)。水稻为浅根系作物,一般90%以上的根系分布于地表以下30 cm以内的土层中,取 $L_r = 0.3$ m。则根据式(6),可计算得到耕作层根系吸水量 $ET_{\text{plant},1}$ 为 $38/45 ET_{\text{plant}}$,犁底层根系吸水量 $ET_{\text{plant},2}$ 为 $7/45 ET_{\text{plant}}$ 。

一般水稻生育初期植株小,地面裸露大,水分消耗以株间蒸发为主;随着植株生长,叶面覆盖率增大,植株蒸腾逐渐大于株间蒸发。本模型以式(7)来模拟水稻每日的株间蒸发量。

$$ET_{z_j,t} = r_{z_j} \cdot ET_{0t} \quad (7)$$

式中: r_{z_j} 为比例系数,根据相关文献^[21],分蘖期取0.35,孕穗期、抽穗期取0.15,乳熟期取0.32,黄熟期取0.45,返青期由于植株较小,将株间蒸发量与当日水面蒸发量近似相等处理。

(3) 灌溉需水量。

$$DI_t = \begin{cases} h_{\text{max}} - h_{\text{min}} & h_t \leq h_{\text{min}} \\ 0 & h_t > h_{\text{min}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: h_t 为田间淹没水层深度(mm); h_{min} 为田间适宜水层下限(mm); h_{max} 为田间适宜水层上限(mm)。

(4) 毛管上升水量。

在地下水与土壤底面的交界处,因毛管力作用,地下水将以毛管上升水的形式对土壤水进行补充,本模型在前人经验公式基础上加以改进,以此来模拟毛管上升水量。具体如下式所示:

$$CR_t = ET_t \cdot \exp(-b \cdot d) + su \quad (9)$$

式中: b 为反映土壤输水能力的常数,经验系数,对于砂土、壤土和黏土可分别取2.1、2.0和1.9^[22]; d 为地下水埋深(m); su 为常数,可根据排水口实测径流过程反演得到。

(5) 非水田径流模拟。

对于旱地、城镇用地以及林草地等非水田土地利用类型,本模型采用SCS曲线法^[23,24]进行径流量模拟计算,不同土地利用类型的曲线数 CN 根据相关文献选定初始值^[10,24],见表1。

表1 不同土地利用类型对应曲线数 CN 初始值

Tab. 1 Initial CN value for different land uses

| 土地利用类型 | 旱地 | 林地 | 城镇用地 |
|--------|----|----|------|
| CN | 85 | 72 | 91 |

1.2.2 多层土壤间的水分运动

各层土壤的物理性质,如饱和和体积含水率、田间持水量、饱和水力传导度等不同,导致各个土层内的水平衡过程及不同土层间的水转化关系存在差异。本模型根据湖北荆门试验研究^[25],将土壤分为三层,包括耕作层(地表以下0~20 cm)、犁底层(地表以下20~35 cm)及底土层(地表下35 cm及以下),分别模拟计算各层土壤的水平衡过程,并假设水分在土层中均匀分布。各层土壤的物理参数均由实地试验测得,以保证模型计算结果的准确性。则各层土壤含水量为

$$\theta_i = \frac{S_{\text{soil},i}}{h_{\text{soil},i}} \quad (10)$$

式中: θ 为某天第 i 层土壤的含水量,%; $S_{\text{soil},i}$ 为某天第 i 层土壤的储水深度(mm); $h_{\text{soil},i}$ 为第 i 层土壤

厚度(mm)。令 $i = 1$ 表示耕作层, $i = 2$ 表示犁底层, $i = 3$ 表示底土层。

(1) 耕作层水平衡。

本模型将耕作层土壤与田间淹没水层综合考虑, 引入田间储水量对其水平衡过程进行描述, 具体如式(3)所示。

(2) 犁底层水平衡。

犁底层接受耕作层渗漏水量补充, 同时以作物根系吸水、侧渗和向底土层渗漏形式损失水量, 建立其水量平衡方程, 具体表示为

$$S_{\text{soil}, 2, t} = S_{\text{soil}, 2, t-1} + DP_{1, t} - ET_{\text{plant}, 2, t} - DP_{2, t} - DP_{\text{hf}, 2, t} \quad (11)$$

式中: $S_{\text{soil}, 2, t}$ 、 $S_{\text{soil}, 2, t-1}$ 分别为第 t 天、第 $t-1$ 天犁底层土壤的储水量; $DP_{1, t}$ 为第 t 天耕作层土壤垂直入渗量; $ET_{\text{plant}, 2, t}$ 为第 t 天犁底层作物根系吸水量; $DP_{2, t}$ 为第 t 天犁底层垂直入渗至底土层的水量; $DP_{\text{hf}, 2, t}$ 为第 t 天犁底层侧渗水量。以上变量的单位均为 mm。

犁底层土质黏重, 特别是中部和下部土层对水分下渗有较强的抑制作用, 减少深层下渗, 起到保水作用。

(3) 底土层水平衡。

由于犁底层的保水作用, 底土层接受犁底层渗漏补给的水量很少, 根据前期研究成果表明^[25], 底土层土壤含水率基本保持不变, 本模型默认底土层土壤含水率为该层田间持水量。然后考虑底土层的侧渗和向浅层地下水层的渗漏, 可建立底土层水平衡方程, 具体为

$$DP_{2, t} = DP_{3, t} + DP_{\text{hf}, 3, t} \quad (12)$$

式中: $DP_{3, t}$ 为第 t 天底土层垂直入渗至地下水层的水量 (mm); $DP_{\text{hf}, 3, t}$ 为第 t 天底土层侧渗水量 (mm)。

(4) 渗漏过程。

在计算各土壤层的渗漏量时, 如果某层的含水量超过其田间持水量, 且下层未饱和时, 水分将会渗漏。假设当土壤饱和时, 渗漏量为定值, 当土壤含水率在田间持水量和饱和含水率之间时, 渗漏量与土壤含水率成线性关系^[26]。具体表示为

$$DP_{\text{able}, i} = \begin{cases} DP_{0, i} & \theta_i - \theta_{\text{sat}, i} \\ \frac{\theta_i - \theta_{\text{fc}, i}}{\theta_{\text{sat}, i} - \theta_{\text{fc}, i}} \cdot DP_{0, i} & \theta_{\text{fc}, i} < \theta_i < \theta_{\text{sat}, i} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $DP_{0, i}$ 为第 i 层土壤饱和时的日渗漏量, 通过试验确定 (mm); θ_i 为某天该层土壤体积含水率, $\theta_{\text{fc}, i}$ 为该层土壤田间持水量。

下层土壤可接受的垂直入渗量为下层土壤达到

饱和时的储水量与实际储水量之差, 具体表示为

$$DP_{\text{acceptable}, i} = (\theta_{\text{sat}, i} - \theta_i) \cdot h_{\text{soil}, i} \quad (14)$$

式中: $DP_{\text{acceptable}, i}$ 为第 i 层土壤某天可接受上层土壤的垂直渗漏量 (mm)。

则某天第 i 层土壤的垂直渗漏量为

$$DP_i = \text{MIN}(DO_{\text{able}, i}, DP_{\text{acceptable}, i+1}) \quad (15)$$

上层土壤渗漏至下层土壤的水量如果超过了下层土壤可接受量, 则超过部分以侧渗形式流出该层土壤, 则某天第 i 层土壤侧渗水量为

$$DP_{\text{hf}, i, t} = r \cdot S_{\text{soil}, i, t} + DP_{\text{able}, i, t} - DP_{i, t} \quad (16)$$

式中: r 为侧渗系数, 本模型取 0.01^[27]。

1.2.3 浅层地下水转化

浅层地下水层的水量平衡方程为

$$aq_{\text{sh}, t} = aq_{\text{sh}, t-1} + w_{\text{supply}, \text{sh}, t} - q_{\text{gw}, t} - CR_t \quad (17)$$

式中: $aq_{\text{sh}, t}$ 为第 t 天浅层地下水层的储水量; $aq_{\text{sh}, t-1}$ 为第 $t-1$ 天浅层地下水层的储水量; $w_{\text{supply}, \text{sh}, t}$ 为第 t 天浅层地下水层的补给量; $q_{\text{gw}, t}$ 为第 t 天汇入排水沟的地下水径流量; CR_t 为第 t 天因土壤水分不足而进入土壤带的水分。以上变量的单位均为 mm。

(1) 补给。

水分渗漏通过土壤最底层进入地下水层。水分流出土壤剖面与地下水层补给过程中的时间延迟, 本模型应用指数衰减权重函数来考虑^[24]。第 t 天地下水层的总补给量计算如下:

$$w_{\text{supply}, t} = \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\delta_{\text{gw}}}\right) \right] DP_{3, t} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{\text{gw}}}\right] w_{\text{supply}, t-1} \quad (18)$$

式中: $w_{\text{supply}, t}$ 为第 t 天地下水层的总补给量 (mm); δ_{gw} 为延迟时间 (d); $DP_{3, t}$ 为第 t 天底土层垂直入渗至地下水层的水量 (mm); $w_{\text{supply}, t-1}$ 为第 $t-1$ 天地下水层的总补给量 (mm)。

地下水层的总补给量进入浅层地下水层, 而后其中一部分会进入深层地下水层, 则某天浅层地下水层的补给量为

$$w_{Lz} = (1 - \alpha_{\text{deep}}) w_{\text{supply}, t} \quad (19)$$

式中: α_{deep} 为进入深层地下水层的水量比例系数。

进入到深层地下水层的水量不参与水量收支计算, 可以看作损失部分。

(2) 地下水径流。

浅层地下水可以补给于流域内的排水沟道, 本模型中假设仅当浅层地下水层的储水量超过设定的水位阈值 aq_{shq} 时, 进行补给, 补给量为当天浅层地下水层储水量与水位阈值间差值。即

$$q_{\text{gw}, t} = aq_{\text{sh}, t} - aq_{\text{shq}} \quad (20)$$

式中: $q_{gw,t}$ 为第 t 天浅层地下水层补给排水沟的水量 (mm); $a_{qn,t}$ 为第 t 天浅层地下水层的储水量 (mm); a_{qshq} 为设定的浅层地下水层水位阈值 (mm)。

1.2.4 塘坝水转化

塘坝具有积蓄雨水、拦截地表径流和灌溉回归水的功能,发挥着重要的调蓄作用,灌区塘坝数量多、分布广,除了从渠道引水灌溉农田,当地村民还抽取塘坝水灌溉旱地,部分塘坝直接分布在排水沟系上,排水对塘坝进行库容补充。

本模型以塘坝蓄水量作为状态变量,建立其与各输入输出变量间的水平衡方程,沿排水沟水流方向,对流经的各子流域依次进行计算,塘坝水平衡方程表示为

$$V_t = V_{t-1} + W_{inr} - W_{ELt} - W_{irr} \quad (21)$$

式中: V_t 、 V_{t-1} 分别为第 t 天、第 $t-1$ 天塘坝蓄水量; W_{inr} 为第 t 天塘坝来水量,包括塘面集雨量、非水田地表径流量以及上游排水沟充库水量; W_{ELt} 为第 t 天塘坝损失水量,包括塘面蒸发损失量和塘坝渗漏损失量; W_{irr} 为第 t 天塘坝供水量。各变量单位均以 m^3 表示。

(1) 塘坝入流量。

$$W_{inr} = \sum_{i=1}^n D_{it} \cdot A_{fi} / 1000 + P_t \cdot A_p / 1000 + W_{ck,t} \quad (22)$$

式中: D_{it} 为第 t 天第 i 种非水田土地利用类型地表径流量 (mm); A_{fi} 为第 i 种非水田土地利用类型面积 (m^2); P_t 为第 t 天降雨量 (mm); A_p 为塘坝面积 (m^2); $W_{ck,t}$ 为第 t 天上游排水沟对塘坝的充库量 (m^3)。

(2) 塘坝损失水量。

$$W_{ELt} = E_{0t} \cdot A_p / 1000 + W_{loss,t} \quad (23)$$

式中: E_{0t} 为第 t 天水面蒸发量 (mm); $W_{loss,t}$ 为第 t 天塘坝渗漏量 (m^3),由实际观测数据求得。

(3) 塘坝供水量。

根据实地调查,研究区域内旱地灌溉用水由塘坝提供,则塘坝供水量为

$$W_{irr} = DI_{dt} \cdot A_d / 1000 \quad (24)$$

式中: DI_{dt} 为第 t 天旱地灌溉需水量 (mm); A_d 为旱地面积 (m^2)。

(4) 塘坝泄水量。

当 $V_{t-1} + W_{inr} - W_{ELt} - DI_{dt} > V_m$ (V_m 为塘坝最大蓄水容量) 时,塘坝泄水量 $X_t = V_{t-1} + W_{inr} - W_{ELt} - DI_{dt} - V_m$ (X_t 单位为 m^3)。

1.2.5 排水沟道演算过程

水田排水以及塘坝泄水排入沟道,向下游运动,沟道中的水分因沟床渗漏而损失,通过直接降落在

沟道水面的雨水进行补充。本模型通过建立排水沟道水量平衡方程,模拟计算排水口径径流过程,水量平衡方程表示为

$$Q_{out} = Q_{Pr} + X_t + Q_{DRt} - Q_{Lt} \quad (25)$$

式中: Q_{out} 为第 t 天排水口径流量; Q_{Pr} 为第 t 天降雨补充沟道水量; X_t 为第 t 天塘坝泄水量; Q_{DRt} 为第 t 天水田田间排入沟道的水量; Q_{Lt} 为第 t 天沟道输水损失水量。单位均为 m^3 。

(1) 降雨补充沟道水量。

$$Q_{Pr} = P_t \cdot A / 1000 \quad (26)$$

式中: A 为沟道接收降雨面积 (m^2)。

(2) 沟道输水损失水量。

沟道输水损失水量用经验公式来估算,常用经验公式为

$$q_{Lt} = \sigma \cdot L \cdot q_{inr} \quad (27)$$

式中: q_{Lt} 为第 t 天沟道输水损失流量 (m^3/s); L 为沟道长度 (km); σ 为每公里沟道输水损失系数; q_{inr} 为第 t 天沟道入流量 (m^3/s)。

每公里沟道输水损失系数 σ 亦采用经验公式估算,常用经验公式为

$$\sigma = \frac{A}{100q_{inr}^m} \quad (28)$$

式中: A 为沟床土壤透水系数,取 $A = 1.9$; m 为沟床土壤透水指数,取 $m = 0.4^{[20]}$ 。

用公式计算出来的输水损失量是在不受地下水顶托影响条件下的损失水量,若研究区域地下水位较高,渠道渗漏受地下水壅阻影响,实际渗漏水量比计算结果小,故须给计算结果乘上一个修正系数加以修正,即

$$q'_{Lt} = \gamma \cdot q_{Lt} \quad (29)$$

式中: γ 为地下水顶托修正系数,取 $\gamma = 0.82$ 。

则沟道输水损失水量为

$$Q_{Lt} = 86400q'_{Lt} \quad (30)$$

式中: q'_{Lt} 为考虑地下水顶托影响后的沟道输水损失流量 (m^3/s); 86 400 为时间系数 (s)。

2 实例应用

2.1 研究区概况

谭店灌排系统位于湖北省荆门市掇刀区, 112. 16°E、30. 91°N,属漳河灌区,面积 2 66 km^2 ,北依漳河灌区总干渠,东邻凤凰水库,距漳河水库 13. 6 km,灌溉水源充足,经实地调研,当地村民优先引渠道水进行水田灌溉,旱地则引塘坝水进行灌溉。本区属长江中下游亚热带季风气候类型,区内多年平均气温 15. 8 $^{\circ}C$,多年平均降雨量 903. 3

mm, 多年平均蒸发量 1 413.9 mm。本区大部分耕地质地粘重, 透水性较差, 保水、保肥、抗旱能力较强, 易于种植水稻。

2.2 模型输入

2.2.1 空间数据

(1) DEM (数字高程模型) 与子流域划分。

所用数字高程数据从地理空间数据云网站上获得, 为 GDEM V2 30M 分辨率数字高程数据, 投影坐标系为 Beijing_1954_3_Degree_GK_CM_111E, 区域 DEM 见图 3。根据研究区实际情况, 人为定义子流域边界, 生成反映真实渠系沟系的分布图, 本灌排系统共划分为 10 个子流域, 见图 4。

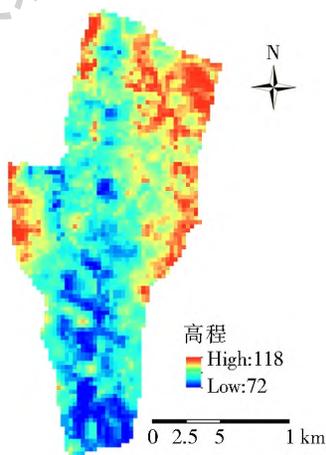


图 3 研究区域 DEM 图

Fig. 3 Digital Elevation Model of the study area



图 4 研究区域子流域划分

Fig. 4 Division of sub basins in the study area

(2) 土地利用类型数据。

研究区土地利用类型根据实地调研成果, 借由 Arcgis 平台绘制而成, 为简化计算, 若某种土地利用类型面积所占研究区总面积比例小于 3%, 则忽视该土地利用类型, 将其整合到相近土地利用类型, 整合后的研究区土地利用类型分为水稻田、旱地、塘坝、城镇用地以及林地等 5 类, 详见表 2。

表 2 谭店灌排系统土地利用类型分类

Tab.2 Land uses of Tandian irrigation and drainage system

| 编号 | 土地利用类型 | 原面积百分比/% | 重新分类后名称 | 变量名 | 重新分配后面积百分比/% |
|----|--------|----------|---------|------|--------------|
| 1 | 水稻田 | 70.14 | 水稻田 | RICE | 70.14 |
| 2 | 旱稻田 | 9.52 | | | |
| 3 | 设施农业 | 0.44 | 旱地 | DRLD | 11.64 |
| 4 | 蔬菜 | 0.72 | | | |
| 5 | 果树 | 0.96 | | | |
| 6 | 湿地 | 1.35 | | | |
| 7 | 塘坝 | 6.74 | 塘坝 | POND | 10.78 |
| 8 | 沟道 | 2.69 | | | |
| 9 | 城镇用地 | 3.36 | 城镇用地 | URHD | 3.36 |
| 10 | 林地 | 4.08 | 林地 | FOST | 4.08 |

(3) 土壤类型。

谭店灌排系统土壤耕作层、犁底层以及底土层各项物理参数, 由试验测定, 具体见表 3。

表 3 各层土壤物理及水动力参数^[25]

Tab.3 Physical and hydrodynamic parameters of each soil layer

| 土层 | 饱和体积含水量 θ_{sat} | 田间持水量 θ_{fc} | 饱和水力传导度 $k_{sat}/(mm \cdot d^{-1})$ |
|--------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 耕作层(0~20cm) | 0.52 | 0.35 | 648.0 |
| 犁底层(20~35cm) | 0.45 | 0.31 | 72.6 |
| 底土层(>35cm) | 0.41 | 0.24 | 115.2 |

2.2.2 水文气象数据

谭店灌排系统有一条支沟和斗沟由北向南穿越全境, 还有一条农沟自灌排系统中部延伸至南部边界。支沟和斗沟的进水流量由实测数据确定, 农沟由于无接收上游沟道水量, 故模型中进水流量为 0。灌排系统边界上各水量输入点的流量数据根据 2014-2015 年暑期在当地监测得到。

本文所用的气象资料来源于漳河团林试验站 2014-2015 年监测的逐日降雨量、最高气温、最低气温、相对湿度、大气压力、相对湿度、风速、日照时数等数据。

2.2.3 作物系数

谭店灌排系统以水稻作为主要农作物, 其作物实际需水量采用作物系数法计算得到, 下表为湖北省中稻作物需水系数 k_c 值。

表 4 湖北省中稻作物需水系数 k_c 值

Tab.4 Crop water requirement coefficient k_c of middle season rice in Hubei Province

| 月份 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|------|------|------|------|------|
| k_c | 1.03 | 1.35 | 1.50 | 1.40 | 0.94 |

2.2.4 水稻各生育期淹灌水层深度

本模型中需要输入水稻各生育期天数以及淹灌水层深度,用于计算水文循环过程各组分量。本文输入常规淹灌方式下的水层深度,具体见表5。

表5 水稻各生育期淹灌水层深度

Tab.5 Field water depth of rice at different growth stages

| 生育期 | 月日 | 灌溉下限~灌溉上限~ 排水口高度/mm |
|------|-------------|------------------------|
| 返青期 | 5 26至 6 07 | 5~ 30~ 50 |
| 分蘖前期 | 6 08至 7 17 | 5~ 30~ 50 |
| 分蘖后期 | 7 18至 7 23 | 晒田 |
| 孕穗期 | 7 24至 8 12 | 5~ 40~ 50 |
| 抽穗期 | 8 13至 8 28 | 5~ 40~ 50 |
| 乳熟期 | 8 29至 9 15 | 5~ 40~ 50 |
| 黄熟期 | 9 16至 10 12 | 落干 |

2.3 模型结果分析

2.3.1 参数敏感性分析

在进行参数敏感度分析时,输入参数较多且关系复杂,输入参数和输出结果之间的相关性往往受到其他输入参数的影响,因此只是简单的分析某输入参数和输出结果的相关性是不客观的。准确反映输入参数和输出结果的相关关系,须控制其他输入参数的影响。偏相关分析就是控制其他参数的影响,求得输入变量和输出结果相关性的全局敏感性分析方法。本文采用偏相关法对模型参数进行敏感性分析,探求各参数对排水口径流过程的影响程度。排除若干由实测或依据经验得到的参数,以及对排水口径流过程影响较小的参数后,选取剩下6个参数进行分析,根据研究区域实际情况确定参数的取值范围以及初始值,具体见表6。

进行敏感性分析之前,需要根据统计学原理对参数进行抽样,因拉丁超立方抽样方法能够使抽样的点均匀分布在取值范围内^[28],故本文采用拉丁超立方抽样法对选出的6个模型参数进行分层抽样,通过 Matlab 编程随机生成 500 组参数。将 500 组

抽样参数替换本模型输入文件中对应的参数,并分别导入到本模型中,得到 500 组输出文件。选取在模拟中有重要意义的排水口峰值流量、峰值时间以及总径流量这三个变量,采用偏相关分析法分析参数对输出结果的敏感性。

借助 SPSS 数据分析软件,采用偏相关分析法进行非线性分析,得出各参数与输出变量间的偏相关系数,其中偏相关系数绝对值越大表明参数敏感性越大,绝对值越小则表明敏感性越小;偏相关系数为正,表明参数与输出变量为正相关关系,反之,偏相关系数为负则为负相关。分析结果见表7,直方图见图5。

表6 参数取值范围及初始值

Tab.6 Value range and initial value of parameters

| 参数编号 | 参数名称 | 定义 | 取值范围 | 初始值 |
|------|------------|------------------|--------|-------|
| 1 | h_{min} | 水田田间适宜水层下限/mm | 0~ 30 | 5.00 |
| 2 | h_{irr} | 水田一次性灌溉水量/mm | 0~ 60 | 25.00 |
| 3 | H_p | 水田排水口高度/mm | 0~ 150 | 50.00 |
| 4 | CN_d | 旱地曲线数 | 0~ 100 | 85 |
| 5 | su | 毛管上升水补充常数/mm | 0~ 5 | 3.00 |
| 6 | $DP_{0.1}$ | 耕作层土壤饱和时的日渗漏量/mm | 0~ 10 | 2.00 |

表7 参数敏感性结果

Tab.7 Sensitivity analysis of parameters

| 参数编号 | 参数 | 输出变量 | | | | | |
|------|------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | 峰值流量 | | 峰值时间 | | 总径流量 | |
| | | r 值 | 显著性 | r 值 | 显著性 | r 值 | 显著性 |
| 1 | h_{min} | 0.083 | 0.064 | 0.028 | 0.528 | 0.064 | 0.153 |
| 2 | h_{irr} | 0.014 | 0.753 | 0.069 | 0.127 | 0.022 | 0.633 |
| 3 | H_p | 0.014 | 0.753 | 0.069 | 0.127 | 0.022 | 0.633 |
| 4 | CN_d | - 0.083 | 0.064 | - 0.028 | 0.528 | - 0.064 | 0.153 |
| 5 | su | 0.407 | 0 | 0.171 | 0 | 0.453 | 0 |
| 6 | $DP_{0.1}$ | - 0.178 | 0 | - 0.080 | 0.074 | - 0.174 | 0 |

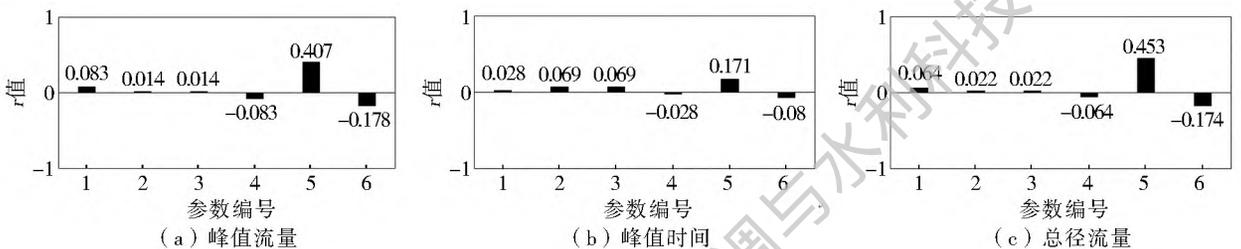


图5 参数敏感性直方图

Fig.5 Histogram displaying sensitivity of parameters

由表7和图5可知,对峰值流量而言,参数 su 和 $DP_{0.1}$ 相对较为敏感,偏相关系数分别为 0.407 和 -0.178,显著性概率值为 0,结果可靠。 su 与峰

值流量之间呈正相关, su 增大将使峰值流量增大,这是因为毛管上升水量增加,使得田间储水量增大,排水量加大,从而增大了峰值流量。参数 $DP_{0.1}$ 与

峰值流量之间呈负相关, $DP_{0.1}$ 增大将使峰值流量减小, 这是因为耕作层土壤渗漏量增大, 使得田间储水量减小, 排水量减小, 从而减小了峰值流量。

对峰值时间而言, 6 个参数与其的偏相关系数都较小, 敏感性不高, 说明以上 6 个参数对峰值时间的影响不大。

对总径流量而言, 参数 su 最为敏感, 偏相关系数为 0.453, $DP_{0.1}$ 相对较为敏感, 偏相关系数为 0.174, 显著性概率值均为 0, 结果可靠。 su 与总径流量之间呈正相关关系, su 增大将使总径流量增大, 这是因为毛管上升水补充耕作层土壤的水量增加, 田间储水量增大, 排水量加大, 从而增大了总径流量。参数 $DP_{0.1}$ 与总径流量之间呈负相关, 即 $DP_{0.1}$ 增大将使总径流量减小, 这是因为耕作层土壤渗漏量增大, 使得田间储水量减小, 排水量减小, 从而减小了总径流量。

2.3.2 模型率定与验证

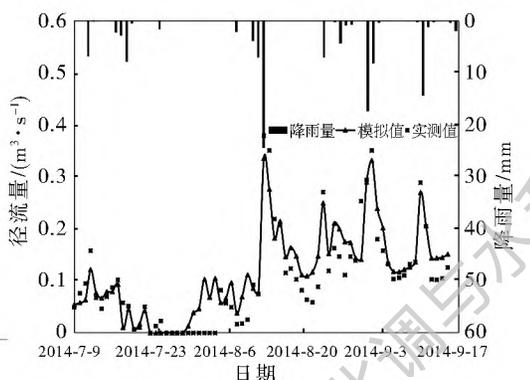
在参数敏感性分析结果基础上, 利用谭店灌排

系统 2014 年支沟、斗沟、农沟排水口的径流量实际监测数据对模型进行参数率定, 率定后的主要参数取值见表 8, 支沟、斗沟率定期和验证期排水口径流过程实测值与模拟值对比效果图分别见图 6、图 7。率定后, 农沟排水口模拟径流过程与实际差异较大, 原因可能是农沟涉及的区域面积较小, 村民加高田埂高度, 抽水灌溉等田间管理措施对区域水转化过程影响较大, 而实际调查中未能及时发现记录, 导致模拟效果不佳。

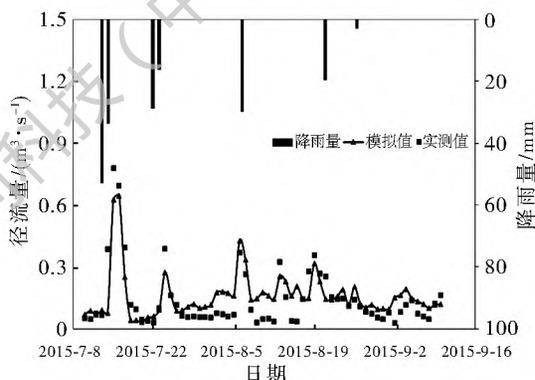
表 8 率定的参数值

Tab. 8 Calibrated parameters

| 参数编号 | 参数 | 初始值 | 率定值 |
|------|------------|-------|-------|
| 1 | h_{min} | 5.00 | 11.60 |
| 2 | h_{irr} | 25.00 | 15.18 |
| 3 | H_p | 50.00 | 37.96 |
| 4 | CN_d | 85 | 86 |
| 5 | su | 3.00 | 2.36 |
| 6 | $DP_{0.1}$ | 2.00 | 6.22 |



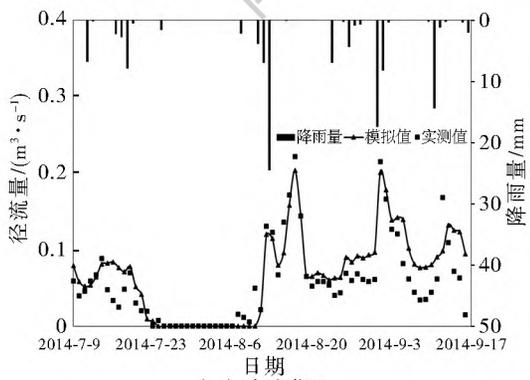
(a) 率定期



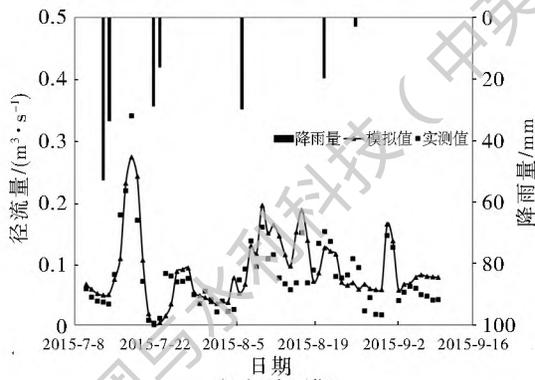
(b) 验证期

图 6 支沟率定期和验证期排水口径流过程

Fig. 6 Runoff process of branch ditch during calibration period and validation period



(a) 率定期



(b) 验证期

图 7 斗沟率定期和验证期排水口径流过程

Fig. 7 Runoff process of tertiary ditch during calibration period and validation period

选用线性回归系数 R^2 和 Nash-Suttcliffe 系数 (Ens) 来评估模型在率定及验证过程中的模拟效果, 要求排水口径流量的 $R^2 > 0.6$ 且 $Ens > 0.5$ 。率

定期和验证期模型模拟效果评价指标结果见表 9, 表明模型在研究区域取得了较好的模拟效果, 该模型适用于灌排系统水转化过程模拟。

表 9 模拟效果评价
Tab. 9 Simulation effect

| 沟道 | 评价指标 | 率定期 | 验证期 |
|----|-------|------|------|
| 支沟 | R^2 | 0.83 | 0.70 |
| | Ens | 0.81 | 0.68 |
| 斗沟 | R^2 | 0.79 | 0.68 |
| | Ens | 0.73 | 0.62 |

3 与 SWAT 模型对比

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是一种分布式水文模型, 广泛应用于自然流域或灌区水文过程模拟研究^[29]。为进一步探究证明本文所构建

的 WTIDS 模型的先进性及有效性, 针对同一研究区域, 建立基于 SWAT 的水转化模型, 以此模拟研究区域的水转化过程, 并对分析两个模型的模拟效果。

研究区域为谭店灌排系统, SWAT 模型采用传统 D8 方法, 基于数字高程数据划定区域边界, 定义水系分布及流向, 在平原及丘陵地区, 其边界划分和水系定义结果与实际情况往往有较大出入。WTIDS 模型则充分考虑道路、堤防或渠沟分布等人为因素对灌排系统水文过程的影响, 并将其作为定义灌排系统边界范围的依据。对于谭店灌排系统, SWAT 模型共划分子流域 23 个, WTIDS 模型共划分子流域 7 个。具体划分情况见图 8。

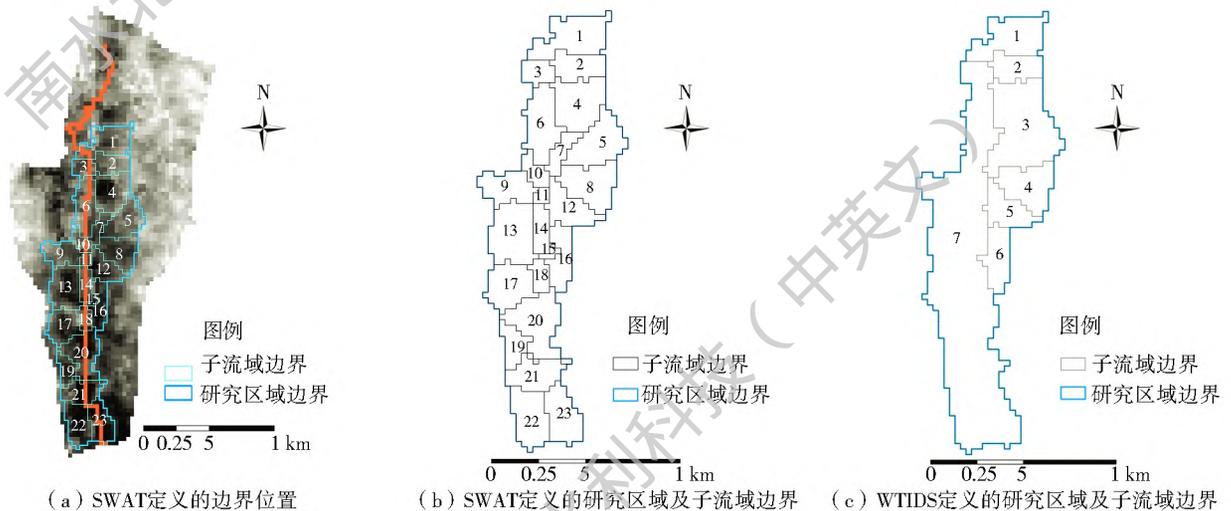


图 8 WTIDS 与 SWAT 模型研究区域边界定义情况对比

Fig. 8 Boundaries of the study area as defined by WTIDS and SWAT models

分别利用两个模型模拟计算出排水口径流过程, 并采用 R^2 和 Ens 来对比模型模拟效果, 具体模拟结果及效果见图 9。由图 9 可知, SWAT 模型模拟评价指标 R^2 为 0.11, Ens 为负数。而 WTIDS 模型模拟结果的 R^2 和 Ens 分别为 0.73 和 0.70, 达到

了 $R^2 > 0.6$ 且 $Ens > 0.5$ 的要求, 说明相对于 SWAT 模型, WTIDS 模型能更好刻画灌排系统子流域划分和水系分布情况, 能更为真实地反映灌排系统的水转化过程, 适用性更加优越, 具有一定的先进性。

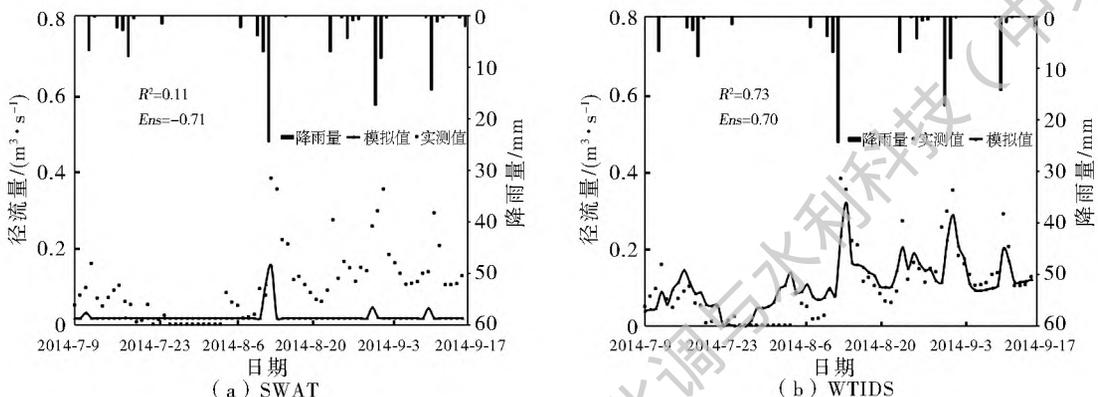


图 9 WTIDS 与 SWAT 模型模拟结果

Fig. 9 Simulation results of WTIDS and SWAT models

4 结论

(1) 本文分析了灌排系统水转化过程, 以水量平

衡为原理, 研发了灌排系统边界处置、稻作区田间多层土壤、塘坝及排水沟道之间多个水转化模拟子模块, 构建了一种客观描述灌排系统边界半封闭结构

及其水平输送、垂直运动与渠—田—沟—塘水转化过程的耦合模拟模型,并利用研究区域支沟、斗沟径流实测数据进行模型的率定及验证,发现支沟率定期和验证期模拟结果的复相关系数分别为 0.83、0.70, E_{ns} 系数分别为 0.81、0.68,斗沟率定期和验证期模拟结果的复相关系数分别为 0.79、0.68, E_{ns} 系数分别为 0.73、0.62,表明该模型适用于灌排系统水转化过程模拟。

(2) 与 SWAT 模型模拟结果进行对比,发现对于同一研究区域,模拟结果的复相关系数由 0.11 提高到 0.73, E_{ns} 系数由 -0.71 提高到 0.70,进一步验证了该模型的先进性,为灌排系统水转化过程模拟与机制研究提供了新方法。

(3) 应用构建的 WTIDS 模型模拟时,所需率定的参数较少;其他与排水口径流过程直接或间接相关的参数,如土壤体积饱和含水率、沟床土壤透水系系数等都由实测或依据经验得到,易于获取。经过实例应用证明,WTIDS 模型在南方水稻灌排系统中具有良好的适用性,如何研究分析研究尺度扩大对水转化关系的影响以及该模型在不同研究区域的适用性,将是下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] XUE J, REN L. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agricultural model in an irrigation district of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 350-365.
- [2] DE MARIA A S C, RIENZNER M, FACCHI A, et al. Water balance implications of switching from continuous submergence to flush irrigation in a rice growing district[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 108-119.
- [3] 李颖,王康,周祖昊.基于 SWAT 模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 42-53. (LI Y, WANG K, ZHOU Z H. Simulation of drainage and agricultural non point source pollutions transport processes in paddy irrigation district in North East China using SWAT[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(7): 42-53. (in Chinese))
- [4] 冯绍元,蒋静,霍再林,等.基于 SWAP 模型的春小麦咸水非充分灌溉制度优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 66-75. (FENG S Y, JIANG J, HUO Z L, et al. Optimization of irrigation scheduling under deficit irrigation with saline water for spring wheat based on SWAP model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(9): 66-75. (in Chinese))
- [5] NOORY H, VAN DER ZEE S E A T, LIAGHAT A M, et al. Distributed agricultural hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir Irrigation and Drainage Network in Northern Iran[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1062-1070.
- [6] 张银辉,罗毅.基于分布式水文学模型的内蒙古河套灌区水循环特征研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(5): 763-771. (ZHANG Y H, LU O Y. Water cycle modeling in Hetao irrigation district of inner Mongolia based on the distributed DEHYDROS model[J]. *Resources Science*, 2009, 31(5): 763-771. (in Chinese))
- [7] 吴洪伟.中国重点型灌区节水配套改造发展战略研究[D].北京:中国农业科学院,2012. (WU H W. Development strategy on systematic design of water saving projects in key medium sized irrigation areas in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese))
- [8] 康绍忠.水安全与粮食安全[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 880-885. (KANG S Z. Towards water and food security in China [J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2014, 22(8): 880-885. (in Chinese))
- [9] 冯保清.我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013. (FENG B Q. Study on the evaluation and management of irrigation water use efficiency for different scales in countrywide [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research (IWHR), 2013. (in Chinese))
- [10] 代俊峰,崔远来.基于 SWAT 的灌区分布式水文模型—— \hat{N} 模型构建的原理与方法[J]. *水利学报*, 2009, 40(2): 145-152. (DAI J F, CUI Y L. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT \hat{N} . Principle and method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(2): 145-152. (in Chinese))
- [11] 代俊峰,崔远来.基于 SWAT 的灌区分布式水文模型—— $\hat{0}$ 模型应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(3): 311-318. (DAI J F, CUI Y L. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT $\hat{0}$. Model application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3): 311-318. (in Chinese))
- [12] 欧阳威,黄浩波,张璇,等.基于 SWAT 模型的平原灌区水量平衡模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1): 17-22. (OU Y W, HUANG H B, ZHANG X, et al. Simulation of water balance in Hetao irrigation district using SWAT model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(1): 17-22. (in Chinese))
- [13] 马放,姜晓峰,王立,等.基于 SWAT 模型的亚流域划分方法研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(7): 53-57. (MA F, JIANG X F, WANG L, et al. Study on subwatershed delineation based on SWAT Model [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(7): 53-57. (in Chinese))
- [14] 郑捷,李光永,韩振中,等.改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(1): 88-97. (ZHENG J, LI G Y, HAN Z Z, et al. Application of modified SWAT model in plain irrigation district [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 88-97. (in Chinese))
- [15] 罗运祥,苏保林,李卉,等.平原河网地区 SWAT 模型子流域概化方法[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(4): 415-418. (LUO Y X, SU B L, LI H, et al. Sub-basin delineation methods for SWAT model in plain river network region [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*,

- 2011, 47(4): 415-418. (in Chinese)
- [16] DUKE G D, KIENZLE S W, JOHNSON D L, et al. Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into digital elevation models[J]. *Journal of Spatial Hydrology*, 2003, 3(2): F-27.
- [17] 王全九, 汪志荣, 张建丰, 等. 层状土入渗机制与数学模型[J]. *水利学报*, 1998(S1): 77-80. (WANG Q J, WANG Z R, ZHANG J F, et al. Infiltration mechanism of layered soil and its simulation model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(S1): 77-80. (in Chinese))
- [18] 甘永德, 贾仰文, 仇亚琴, 等. 降雨条件下分层土壤入渗特性[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 217-219. (GAN Y D, JIA Y W, CHOU Y Q, et al. Stratified soil infiltration characteristics during rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 217-219. (in Chinese))
- [19] JIA Y, TAMAI N. Modeling infiltration into a multi-layered soil during an unsteady rain[J]. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 1997(41): 3F-36.
- [20] 郭元裕. 农田水利学[M]. 第三版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. (GUO Y Y. *Irrigation and Drainage Engineering* [M]. The third edition. Beijing: China Water & Power Press, 1997. (in Chinese))
- [21] 包莉. 罗江灌区杂交稻腾发量变化及控水条件对产量构成的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016. (BAO L. The change of Luojiang irrigation hybrid rice evapotranspiration and the influence of water control conditions on the yield of rice[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016. (in Chinese))
- [22] 茆智, 李远华, 李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. *武汉水利电力大学学报*, 1995, 28(3): 253-259. (MAO Z, LI Y H, LI H C. Study of mathematic model for forecasting daily crop evapotranspiration[J]. *Journal of Wuhan University of Hydropower & Electric Engineering*, 1995, 28(3): 253-259. (in Chinese))
- [23] ARNOLD J G, KINIRY J R, SRINIVASAN R, 等. ArcSWAT2009 输入输出文件手册[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. (ARNOLD J G, KINIRY J R, SRINIVASAN R, et al. *Soil and Water Assessment Tool Input/ Output File Documentation Version 2009* [M]. Zhengzhou: Yellow River water conservancy press, 2012. (in Chinese))
- [24] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, 等. SWAT2009 理论基础[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. (NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009* [M]. Zhengzhou: Yellow River water conservancy press, 2012. (in Chinese))
- [25] 邵东国, 杨霞, 徐保利, 等. 南方丘陵区多层土壤结构水平和垂直向渗流特征试验与模拟研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(7): 799-807. (SHAO D G, YANG X, XU B L, et al. Field experiment and simulation of lateral and vertical water flow in multi-layer soil in hilly region of southern China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(7): 799-807. (in Chinese))
- [26] 胡能杰, 邵东国, 陈述, 等. 基于系统动力学的稻田塘堰系统水转化模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 130-135. (HU N J, SHAO D G, CHEN S, et al. Simulation and verification of water transformation of rice paddy and pond system based on system dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 130-135. (in Chinese))
- [27] 郑明昇. 桃园灌区之区域回归水分析研究[D]. 国立中央大学水文科学研究所, 1996. (ZHENG M S. Analysis of regional return water in Taoyuan irrigation district[D]. Institute of Hydrology of National Central University, 1996. (in Chinese))
- [28] 段明印, 李传奇, 熊剑智. 基于偏相关法的 SWMM 模型参数全局敏感性分析[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 53-57. (DUAN M Y, LI C Q, XIONG J Z. Parameters sensitivity analysis of SWMM model based on partial correlation method[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(17): 53-57. (in Chinese))
- [29] DESSU S B, MELESSE A M. Modelling the rainfall runoff process of the Mara River basin using the Soil and Water Assessment Tool[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(26): 4038-4049.
- [30] TUCOTTE R, FORTIN J P, ROUSSEAU A N, et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240: 225-242.