

基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应

吴迪¹, 崔远来^{2*}, 黄文波¹, 龚兰强¹, 范国福¹, 安莉娜¹, 李大成¹, 余乾安²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081;

2. 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: 灌溉节水潜力是指导和评价灌区节水改造的重要参数, 其分析需要考虑尺度效应。该研究以湖北漳河灌区杨树岗流域为背景, 采用改进 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型构建灌区分布式水文模型, 并利用实测径流、蒸发蒸腾量及灌溉用水量校正及验证模型。以子流域嵌套方式将研究区划分为 6 个尺度, 基于现状情景, 设置增加塘堰汇流面积、提高渠系水利用系数及采用水稻节水灌溉模式 3 种节水情景。基于改进 SWAT 模型不同情景的模拟结果, 定义并计算分析不同节水情景下传统的及考虑回归水重复利用的 2 种节水潜力及其随尺度变化规律。结果表明, 改进 SWAT 模型具有良好的模拟效果 ($R^2 > 0.80$, 纳什效果系数大于 0.80)。在增加塘堰汇流面积情景下, 由于不同尺度塘堰供水比例的变化, 2 种节水潜力均随着尺度的增大呈现先增加再降低继而趋于稳定的规律; 在提高渠系水利用系数情景下, 由于漳河水库在不同尺度的供水比例的变化, 2 种节水潜力均随尺度增大逐渐降低并趋于稳定; 在水稻节水灌溉模式情景下, 由于不同尺度水稻节水灌溉面积占比的变化, 2 种节水潜力均随尺度增大呈现先减小再增大继而趋于稳定的规律。3 种节水情景下的 2 种节水潜力的大小关系, 主要由节水措施实施前后不同尺度灌溉用水量变化及灌溉回归水重复利用量变化共同决定。研究可为灌区水管理及节水改造工程布局提供决策依据和指导方向。

关键词: 灌溉; 水源; 改进 SWAT 模型; 节水潜力; 尺度效应; 回归水重复利用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.010

中图分类号: TU991.64

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0082-09

吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 82-90. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.010 http://www.tcsae.org

Wu Di, Cui Yuanlai, Huang Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 82-90. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.010 http://www.tcsae.org

0 引言

农业是中国的用水大户, 农业用水量约占总用水量的 60%以上。灌溉用水量约占农业用水量的 90%, 是灌区水管理的重要对象^[1]。灌区节水改造是灌溉节水的重要途径, 灌溉节水潜力是指导和评价灌区节水改造的重要参数。灌溉节水潜力是指在一定的社会经济技术条件下, 采取一种或多种综合节水措施后, 与未采取节水措施相比, 某灌区(或区域)所需水量(或取用水量)的减少量。当前普遍采用灌溉取水节水潜力表示灌区的节水潜力, 即根据节水灌溉措施实施前后灌溉水利用系数及田间净灌溉用水量计算的毛灌溉用水量差值^[2]。回归水及其重复利用是灌区中普遍存在的现象^[3], 尤其是多水源灌区。灌溉取水节水潜力未考虑灌区内部回归水的重复利用, 将深层渗漏和地表回归的水量都作为可节约的水量, 而实际上这些回归水量有一部分仍存在在水资源系统内

部, 并被再次利用, 并非可节约的水量。众多学者^[4-6]指出小尺度范围内的水量损失可在更大尺度范围内重新利用, 即存在回归水重复利用。鉴于此, 近年来很多学者提出了考虑回归水重复利用的灌溉效率及节水潜力计算方法^[7-12]。

由于灌区中存在回归水重复利用, 节水潜力的分析需要考虑尺度效应^[13]。Blanke 等^[14]研究表明, 小区域采用节水措施获得的节水量部分会在较大区域被再次利用; 董斌等^[15]通过对水稻灌区田间尺度及中等尺度的试验观测证明了节水灌溉存在尺度效应; 崔远来等^[16]的研究也表明, 农业灌溉节水评价指标存在尺度效应。然而, 当前灌溉节水潜力的研究主要侧重于某个尺度的节水潜力计算及分析^[12, 17-19], 灌溉节水潜力随尺度变化规律的研究较少。另外, 鲜有研究分析传统灌溉取水节水潜力与考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力随尺度的变化规律的差异。

传统灌溉取水节水潜力的计算需要推求节水措施前后的灌溉用水量, 对于考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力, 还需对回归水重复利用量进行计算。推求灌区灌溉取水节水潜力的基础是水量平衡原理^[20], 鉴于多水源灌区的空间异质性, 分布式水文模型是获得水量平衡要素的一个有效工具。其中, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是一个具有物理基础的分布式水文模型, 它具有自动灌溉模块, 可用于推求作物灌溉用水

收稿日期: 2021-02-23 修订日期: 2021-04-01

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中华人民共和国水利部—中国长江三峡集团有限公司—长江水科学研究联合基金项目资助 (U2040213)

作者简介: 吴迪, 工程师, 研究方向为灌区水管理及水文规划。

Email: 1269133531@qq.com

*通信作者: 崔远来, 教授, 研究方向为节水灌溉理论与技术。

Email: YLCui@whu.edu.cn

量^[21-23]。崔远来等^[24]对 SWAT 模型添加了多水源自动灌溉模型, 可有效地模拟灌区不同尺度不同情景下的传统毛灌溉用水量。Wu 等^[25]基于改进 SWAT 模型提出了回归水重复利用量计算的方法, 并分析了回归水重复利用的尺度效应, 同时 Wu 等^[26]提出了考虑回归水重复利用的灌溉用水量计算方法。

为进一步探求不同灌溉节水潜力随尺度的变化规律, 本文在崔远来等^[24]改进 SWAT 模型及 Wu 等^[25-26]提出的回归水重复利用量计算方法及灌溉用水量计算方法的基础上, 以湖北省漳河灌区杨树垱流域为研究区, 模拟分析不同节水情景下传统灌溉取水节水潜力与考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力在不同尺度的变化规律, 分析 2 种节水潜力在不同尺度变化规律的差异及其原因, 以期对灌区水管理及节水改造工程布局提供决策依据和

指导方向。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域选择位于湖北省漳河灌区杨树垱流域 (30°50'N, 112°11'E), 其位置见图 1。杨树垱流域被漳河灌区的三干渠、三干渠一分干和一条小型支渠包围, 是漳河灌区内部一个相对闭合的区域, 面积约 43.3 km²。研究区属亚热带大陆性气候, 多年平均气温 17 °C, 最高气温 40.9 °C, 多年平均降水 965 mm; 主要土地利用类型为稻田、旱地及林草地等, 其中稻田面积占比接近 60%; 土壤类型以黄棕壤水稻土为主。研究区主要种植水稻、棉花和油菜等作物, 水稻以中稻为主。其中, 中稻为主要灌溉作物, 大部分区域采用淹灌模式。

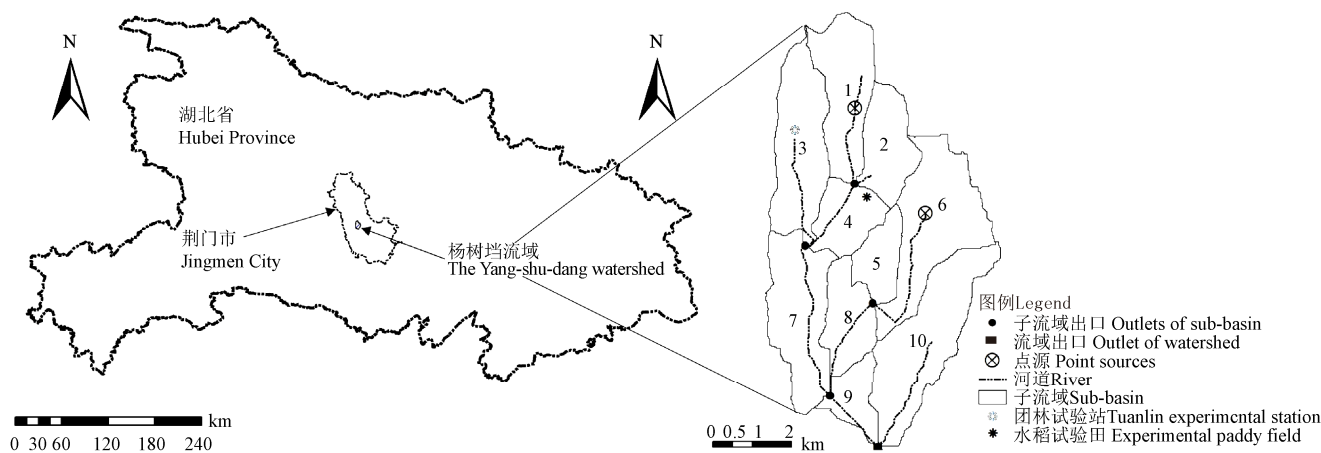


图 1 研究区位置及 10 个子流域划分

Fig.1 The location of study area and ten sub-basins division

1.2 改进 SWAT 模型简述

本文采用改进 SWAT 模型构建研究区的分布式水文模型, 改进 SWAT 模型是多个学者^[24,27-29]根据中国南方多水源水稻灌区的特点对 SWAT 模型^[21-22]进行逐渐改进得到。改进 SWAT 模型首先将研究区划分为多个子流域, 并进一步将各子流域划分为多个水文响应单元 (Hydrological Response Units, HRUs), 最后以 HRUs 为最小计算单元进行水循环模拟。改进 SWAT 模型能够对水稻田的水循环进行有效模拟, 能够通过多水源自动灌溉模块模拟各个 HRU 来自不同水源的灌溉用水量。模拟的步骤如下: 1) 根据灌区水源分布特点指定各子流域内 HRU 的水源及取水顺序。针对南方多水源灌区, 子流域内部河道及塘堰分别为第一水源和第二水源, 后面依次可为中小型水库、大型水库及外部水源等; 2) 指定作物自动灌溉的条件。旱作物采用土壤缺水阈值 (Soil Water Deficiency threshold, SWD), 当土壤缺水超过 SWD 进行灌溉, 其灌溉需水量可参考旱作物的次灌水定额设定。水稻的灌溉排水则由 3 个控制水深进行控制, 即适宜水层上下限 (H_{\max} 、 H_{\min}) 及雨后最大蓄水深度 (H_p)。当稻田水深低于 H_{\min} 时触发灌溉, 灌溉需水量为 H_{\max} 与稻田当前水深之差, 雨后蓄水深度超过 H_p 时产生排水; 3) 进行多水源灌溉模拟, 当自动灌溉条件触发,

从第一个水源开始取水灌溉, 直到达到灌溉需水要求或到最后一个水源为止。

1.3 模型构建与验证

1.3.1 研究区数据及模型构建

基于研究区数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM), 选择杨树垱水库为流域出口, 生成如图 1 所示的河道 (排水沟), 并划分得到 10 个子流域, 其中 DEM 是从长江科学院收集得到, 分辨率为 25 m×25 m。进一步根据研究区的土地利用分布图及土壤类型分布图将研究区离散化得到 105 个 HRUs, 每个子流域中有多个 HRUs, 其中土地利用分布图是从遥感影像中提取, 分辨率为 14.25 m×14.25 m; 土壤类型分布图是通过漳河工程管理局提供的纸质分布图数字化得到, 分辨率为 14.25 m×14.25 m。研究区上述 3 个空间数据见图 2, HRU 作为模型最小计算单元, 对于水稻田而言, 其将多个小田块概化为一个较大的田块进行模拟。杨树垱流域零星地分布着大大小小的塘堰, 这些塘堰具有蓄水功能且蓄积的水被农民用于作物灌溉。模型中需要输入每个子流域的塘堰汇流面积比 (即塘堰汇流面积占子流域面积的比例)、塘堰总库容、塘堰水面面积等。蔡学良^[30]根据漳河灌区不同时期的遥感影像提取得到塘堰分布的信息, 其中杨树垱流域包含其中, 且由于杨树垱近 20 年以

来土地利用类型和塘堰分布基本保持不变,故本文采用蔡学良提取的成果,分析计算得到各子流域的塘堰汇流面积。经分析,现状情景下杨树岗流域塘堰的加权汇流面积比为 0.405。进一步根据实地塘堰深度的调查得到各子流域塘堰总库容参数。将从团林试验站收集得到的团林气象站 1986—2017 的逐日最高气温、最低气温、相对湿度、净太阳辐射值以及降水量输入模型构建研究区分布式水文模型,其中净太阳辐射值是根据日照时数及气象站位置,采用 Penman-Monteith 公式中净太阳辐射模块来计算。最后,输入田间管理措施,包括水稻生育期划分、施肥制度及灌溉操作等,其中施肥制度根据团林试验站提供的试验资料输入,灌溉则采用改进 SWAT 模型的多水源自动灌溉模块^[24,30]进行模拟,以淹灌模式的 3 个控制水深即适宜水层上下限 (H_{\max} 、 H_{\min}) 及雨后最大

蓄水深度 (H_p) 来控制水稻 HRU 的灌溉排水。3 个控制水深来源于团林试验站的试验数据,基于研究区水稻灌溉取水特点,研究区水稻多水源自动灌溉时取水顺序为子流域内部河道(排水沟)、内部塘堰及漳河水库。其中,子流域内部河道和塘堰为当地水源,漳河水库相对于杨树岗流域为外部水源,通过三干渠及一分干向杨树岗流域输水。根据调查得知,农民采用当地水源灌溉时直接就近采用水泵抽水灌溉到田间,无需渠系输配水,故渠系水利用系数为 1.0,根据团林试验站田间试验数据,田间水利用系数为 0.90,灌溉水利用系数为田间水利用系数与渠系水利用系数之积,故当地水源的灌溉水利用系数 η_1 为 0.90。根据漳河水库管理局提供资料,漳河水库供水到研究区的渠系水利用系数为 0.72,则灌溉水利用系数 η_2 为 0.65。

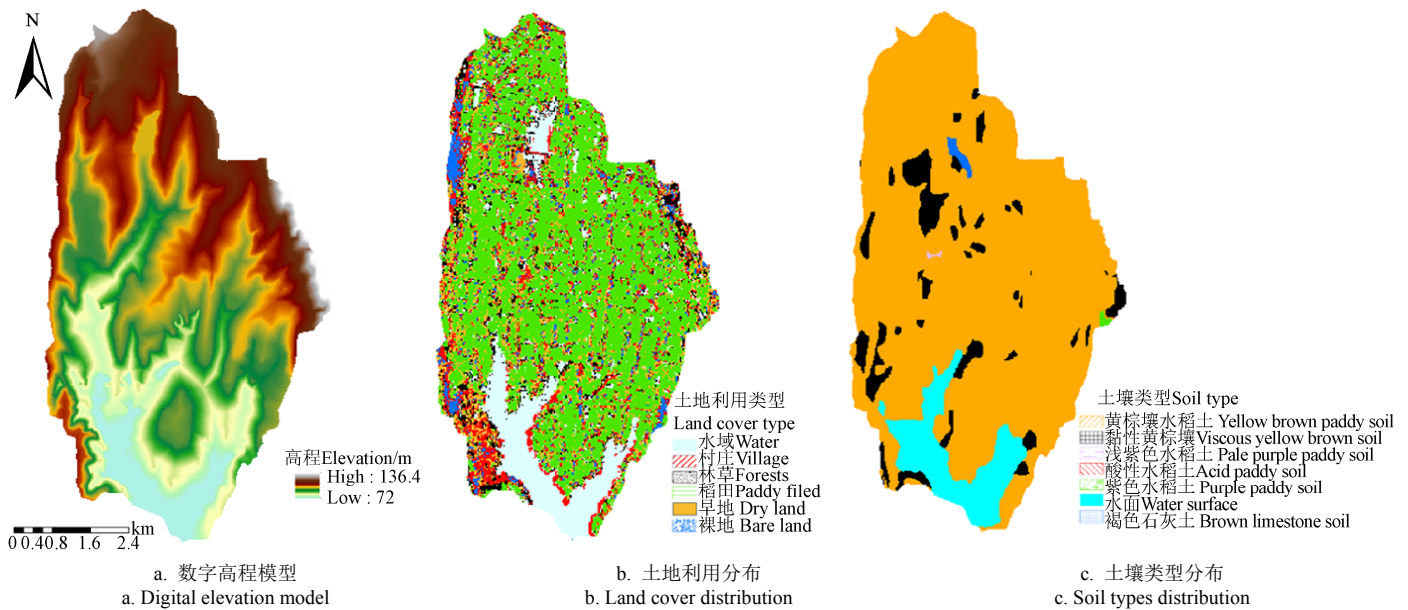


图 2 研究区空间数据

Fig.2 Spatial data of the study area

1.3.2 模型校正与验证

模型构建后需采用实测数据进行校正及验证。本文采用杨树岗流域出口实测逐日径流、典型田块实测逐日蒸发蒸腾量 (Evapotranspiration, ET)、灌溉用水量数据对模型进行校正及验证。根据收集得到的实测数据,将 2005—2009 年作为模型校正期,2016—2017 年作为模型验证期。

针对校正期 2005—2009 年,采用杨树岗流域出口 2005—2009 年水稻生育期实测逐日径流、2007—2008 年水稻生育期实测逐日 ET、杨树岗流域源于当地水源(排水沟及塘堰)及漳河水库的灌溉用水量数据率定模型参数。其中,流域出口实测径流是采用临时流量设备监测得到,到 2010 年临时流量设备被拆除,实测 ET 是利用团林试验站内 2×2 m 的测坑测得,团林试验站位置见图 1,对应 3 号子流域中的典型 HRU,灌溉用水量数据是根据从漳河工程管理局收集得到的资料计算得到。针对验证期 2016—2017 年,由于试验需要,再次在杨树岗流域出口临时安装流量设备监测水稻生育期逐日径流,并选择了另一典型田块进行水平衡要素监测。验证期典型田

块位于 4 号子流域(见图 1),实测 ET 通过典型田块中直径为 618 mm 的测筒测得,典型田块的灌溉水量通过水表观测和记录。

经过调查及研究区历史遥感影像得知,研究区近 20 年的土地利用分布基本一致,农民的灌溉排水习惯亦未发生大的变化,虽校正期与验证期末连续,但若校正期及验证期的模拟效果均满足要求,说明中间年份的模拟效果也较好。本文采用决定系数^[31] (R^2),纳什效率系数 (Nash Efficiency coefficient, NSE)^[32] 以及相对误差^[33] (Relative Error, RE) 作为评价指标,采用 SWATCUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) 软件中的 SUFI_2 算法进行敏感性分析^[34],根据敏感性分析结果选择多个敏感参数,基于校正期 2005—2009 年实测径流、实测 ET 及灌溉用水量数据对敏感参数进行率定从而校正模型,率定时采用模型对校正期 2005—2009 年的水循环进行模拟,用 2005—2009 年水稻生育期流域出口的实测径流、2007—2008 年实测 ET 与 2005—2008 年实测灌溉用水量与相应年份的模拟数据计算评价指标,不同实测数据的评价指标均满足水文模型模拟结果的要求^[35]

时, 模型校正完成。完成模型校正后, 在与校正期相同的模型环境及参数取值下, 利用验证期实测数据对模型进行验证。

1.4 节水潜力计算方法

为对比传统灌溉节水潜力及考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力, 需要计算节水措施实施前后的传统毛灌溉用水量、灌溉回归水重复利用量以及考虑回归水重复利用的毛灌溉用水量。

1.4.1 灌溉回归水重复利用量计算方法

本文灌溉回归水重复利用量的计算采用 Wu 等^[25]基于改进 SWAT 模型提出的方法, 其主要思路如下: 将灌溉回归水分入塘灌溉回归水及入河灌溉回归水, 基于改进 SWAT 模型的模拟输出结果, 计算得到各需灌溉 HRU 的入塘灌溉回归水及入河灌溉回归水, 当降雨和灌溉同时存在时, 以降雨量和灌水量为权重分配得到灌溉回归水量; 以子流域为分析对象, 通过对 HRU 的相应水量求和得到各个流域的入塘灌溉回归水及入河灌溉回归水量, 进一步结合塘堰水灌溉确定重复利用的入塘灌溉回归水量, 结合子流域上下游关系及河道水灌溉确定重复利用的入河灌溉回归水量。详细的阐述参考文献[25]。

1.4.2 灌溉用水量计算方法

本文灌溉用水量的计算采用 Wu 等^[26]提出的方法, 其主要思路为基于改进 SWAT 模型模拟的各 HRU 不同水源类型的灌溉用水量, 通过求和得到各子流域不同水源类型的灌溉用水量, 针对某个尺度将所含子流域对应水量求和即可, 模型模拟输出的值为传统毛灌溉用水量, 对于考虑回归水重复利用的新毛灌溉用水量, 则需要采用 Wu 等^[25]提出的灌溉回归水重复利用量计算方法。针对中国南方多水源灌区, 将水源类型分为河道、塘堰及水库等, 具体公式如下:

$$AIWC_{o,g} = AIWC_{o,rch} + AIWC_{o,pnd} + AIWC_{o,res} \quad (1)$$

$$IRF_{r,all} = IRFP_{r,all} + IRFR_{r,all} \quad (2)$$

$$AIWC_{new,g} = AIWC_{o,g} - IRF_{r,all} \quad (3)$$

式中 $AIWC_{o,g}$ 、 $AIWC_{o,rch}$ 、 $AIWC_{o,pnd}$ 及 $AIWC_{o,res}$ 分别为某尺度总的、来源于河道、塘堰以及水库的传统毛灌溉用水量, m^3 ; $AIWC_{new,g}$ 为某尺度总的考虑回归水重复利用的新毛灌溉用水量, m^3 ; $IRF_{r,all}$ 为某尺度总的重复利用灌溉回归水, m^3 ; $IRFP_{r,all}$ 为入塘的重复利用灌溉回归水, m^3 ; $IRFR_{r,all}$ 为入河的重复利用灌溉回归水, m^3 。具体阐述见文献[26]。

1.4.3 节水潜力计算方法

根据上述灌溉回归水重复利用量及灌溉用水量计算方法, 结合节水潜力的定义, 传统的灌溉取水节水潜力及考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力计算公式如下:

$$WSP_o = AIWC_{o,g,b} - AIWC_{o,g,a} \quad (4)$$

$$WSP_{new} = AIWC_{o,new,b} - AIWC_{o,new,a} \quad (5)$$

式中 WSP_o 和 WSP_{new} 分别为某尺度传统灌溉取水节水潜力及考虑回归水重复利用的灌溉节水潜力, m^3 ; 下标 b 和 a 分别代表采取节水措施之前和之后。

此外, 为分析节水潜力随尺度的变化规律, 定义某尺度节水率为

$$\psi_o = WSP_o / AIWC_{o,g,b} \quad (6)$$

$$\psi_{new} = WSP_{new} / AIWC_{o,new,b} \quad (7)$$

式中 ψ_o 和 ψ_{new} 分别为传统节水率和考虑回归水重复利用的节水率, m^3/m^3 。

1.5 节水情景设置

为探求 2 种节水潜力随尺度的变化规律, 本文针对研究区特点设置了 3 类节水情景如下:

1) 增加塘堰汇流面积。基于现状情景设置 30% 的增幅, 现状的加权塘堰汇流面积比为 0.405, 设置 30% 增幅后则为 0.53, 可通过增加塘堰工程或挖小型沟道将水引至塘堰来增加塘堰汇流面积。

2) 提高渠系水利用系数。对于杨树垱流域, 其水源主要为当地水源 (塘堰、排水沟) 及漳河水库, 其中当地水源基本不用渠系输配水, 而漳河水库则需要采用渠系进行输配水, 可提高渠道防渗标准来提高相应的渠系水利用系数, 本次通过将渠系水利用系数提高至 0.83, 使得漳河水库灌溉水利用系数 η_2 由现状的 0.65 将提高至 0.75。

3) 采用节水灌溉模式。本次将杨树垱流域传统的水稻淹灌模式改变为间歇灌溉模式, 2 种灌溉模式不同生育阶段的 3 个控制水深见表 1。

表 1 不同水稻灌溉模式的控制水深
Table 1 Critical depths of different rice irrigation modes

生育分期 Reproductive stages		时段 Duration	淹灌 Flood irrigation/mm	间歇灌溉 Intermittent irrigation/mm
泡田期 Steeping stage		05-20—05-29	20-40-80	20-40-80
返青期 Recovering stage		05-30—06-07	10-40-60	10-30-50
分蘖期 Tillering stage	有水层 Wet	06-08—07-05	10-40-60	10-40-60
	无水层 Dry	07-06—07-14	20-60-80	0-0-0
拔节孕穗期 Jointing booting stage		07-15—07-30	20-60-80	20-50-70
抽穗开花期 Earing and flowering stage		07-31—08-09	20-60-80	20-50-70
乳熟期 Milky stage		08-10—08-18	20-60-80	10-40-60
黄熟期 Ripening stage	有水层 Wet	08-19—08-26	20-60-80	0-20-30
	落干 Dry	08-27—09-03	0-0-0	0-0-0

1.6 尺度划分

为研究节水潜力的尺度效应, 需要对研究区进行尺度划分。结合研究区划分的子流域情况 (见图 1), 以“子流域集”划分研究区域尺度, 以主河道为主线, 从上游到下游逐层嵌套相应子流域将研究区划分为 6 个尺度, 尺度面积逐渐扩大直至包含整个杨树垱流域, 如表 2 所示。

表 2 研究尺度确定
Table 2 Determination of study scales

尺度 Scales	子流域 Sub-basins	面积 Area/hm ²
1	1	489
2	1, 2, 4	1 083
3	1, 2, 4, 3, 7	2 232
4	1, 2, 4, 3, 7, 5, 6, 8	3 438
5	1, 2, 4, 3, 7, 5, 6, 8, 9	3 625
6	1, 2, 4, 3, 7, 5, 6, 8, 9, 10	4 330

从上游至下游逐层嵌套子流域的方式考虑了上下游子流域之间的水力联系,且可能一定程度符合回归水从上游流向下游,在更大尺度得到重复利用的规律,有利于分析考虑回归水重复利用的节水潜力尺度效应。

2 结果与分析

2.1 模型校正与验证结果

2.1.1 敏感参数及其取值

通过 SWATCUP 软件中的 SUFI_2 算法进行模型中的参数进行敏感性分析,同时采用实测数据对模型进行校正及验证,模型中较为敏感的参数及其取值见表 3。

2.1.2 模拟结果评价

利用 2005—2009 年水稻生育期流域出口逐日实测径流、团林试验站典型田块 2007—2008 年实测逐日 ET 以及杨树岗流域 2005—2008 年当地水源及漳河水库灌溉用水量统计值对构建的模型进行校正。利用 2016—2017 年水稻生育期流域出口逐日实测径流、位于 4 号子流域的典型田块 2016—2017 年实测逐日 ET 及灌水量对模型进行验证。模型校正及验证后的结果见表 4,同时由于本次节水潜力尺度效应分析最重要的为灌溉用水量计算,将模型校正期及验证期的灌溉用水量实测值及模拟值进行对比,分别见表 5 与表 6。流域出口径流及典型田块 ET 实测值与模拟值的对比详见参考文献[26,30]。

表 3 杨树岗流域水文模型敏感性参数及其取值
Table 3 Sensitivity parameters and their values for the hydrological model of the Yang-shu-dang watershed

敏感性排序 Sensitivity ranking	参数 Parameters	参数含义 The meaning of the parameters	不同土地利用类型参数取值 Parameter values of different land use types				
			村庄 Village	稻田 Paddy field	林地 Forests	旱地 Dry land	裸地 Bare land
1	CH_K(2)	主河道冲积物有效渗透系数 Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium/(mm·h ⁻¹)			20.43		
2	MSK_X	马斯京根法的流量比重因子 Flow weigh factor of Muskingum method			0.14		
3	MSK_CO1	马斯京根法的校准系数 Calibration coefficient of Muskingum method			0.4		
4	SURLAG	地表径流滞后系数 surface runoff lag coefficient			9.19		
5	GW_DELAY	地下水的延迟时间 Groundwater delay time/d			0.63		
6	ESCO	土壤蒸发补偿因子 Soil evaporation compensation factor	0.7	0.93	0.3	0.95	0.12
7	USLE_K	USLE 方程中的土壤侵蚀因子 Soil erosion factor in USLE equation			0.11		
8	EPCO	植物吸收补偿因子 Plant uptake compensation factor	0.5	0.69	0.33	0.57	0.93
9	CN2	初始 SCS 径流曲线数 Initial SCS runoff curve number	90	30	47	74	71
10	SOL_AWC	土壤有效含水率 Available soil water content/(mm·mm ⁻¹)			0.36		

表 4 杨树岗流域水文模型校正与验证
Table 4 Calibration and validation for the hydrological model of the Yang-shu-dang watershed

时期 Period	项目 Items	R ²	NSE	RE /%
校正期 Calibration (2005—2009)	逐日径流 Daily discharge	0.83	0.81	-17.37
	逐日蒸发蒸腾量 Daily ET	0.90	0.90	-1.87
	当地水源灌溉用水量 AIWC _{o,local}	/	/	-7.67
	漳河水库灌溉用水量 AIWC _{o,res}	/	/	15.59
	总灌溉用水量 AIWC _{o,g}	/	/	2.75
验证期 Validation (2016—2017)	逐日径流 Daily discharge	0.90	0.89	-17.92
	逐日蒸发蒸腾量 Daily ET	0.95	0.90	-2.38
	灌水量 Irrigation amounts	/	/	9.46

注: 当地水源灌溉用水量为 AIWC_{o,pnd} 及 AIWC_{o,rch} 之和。
Note: Agricultural irrigation water consumption (AIWC_{o,local}) is the sum of AIWC_{o,pnd} and AIWC_{o,rch}.

由表 4 可知,改进 SWAT 模型具有良好的模拟效果 ($R^2>0.80$, $NSE>0.80$),适用于杨树岗流域的水循环模拟。由表 5 可知,校正期中 2005 年不同水源类型的灌溉用水量相对误差绝对值大于 20%,分析其原因为 2005 年水稻生育期的降雨量较低 (358 mm),属于干旱年份,实际灌溉中将河道及塘堰水用完后,漳河水库也未能全部满足研究区的需水要求,但在改进 SWAT 模型中由于漳河水库作为外部水源,因此假设其能够充分满足需水要求,因此导致漳河水库灌溉用水量模拟值偏大,故而致使 2005 年模拟效果不佳。但从总体而言,同时结合表 6 中的结果,改进 SWAT 模型能够有效模拟输出灌区不同水源类型的灌溉用水量。

表 5 校正期杨树岗流域农业灌溉用水量模拟值与实测值对比
Table 5 Comparison between simulated and observed Agricultural Irrigation Water Consumption (AIWC) of the Yang-shu-dang watershed in calibration period

年份 Year	当地水源 (河道及塘堰) 灌溉用水量 AIWC from local water sources (Rivers and ponds)			漳河水库灌溉用水量 AIWC from Zhanghe Reservoir		
	模拟值 Simulation/10 ⁴ m ³	实测值 Observation/10 ⁴ m ³	相对误差 RE/%	模拟值 Simulation/10 ⁴ m ³	实测值 Observation/10 ⁴ m ³	相对误差 RE/%
2005	585.92	762.92	-23.20	728.92	544.95	33.76
2006	498.91	558.57	-10.68	692.82	695.09	-0.33
2007	673.47	613.86	9.71	347.92	294.32	18.21
2008	594.22	612.61	-3.00	619.30	532.38	16.33
均值 Average	588.13	636.99	-7.67	597.24	516.68	15.59

表 6 验证期典型田块灌水量模拟值与实测值对比

Table 6 Comparison between simulated and observed irrigation amount of typical field in validation period

年份 Year	模拟值 Simulation/mm	实测值 Observation/mm	相对误差 RE/%
2016	225	185	21.62
2017	284	280	1.43
均值 Average	254.5	232.5	9.46

2.2 不同节水情景的节水潜力尺度效应及原因分析

利用建立的研究区水文模型模拟现状及 3 种节水情景下的水循环过程及灌溉用水量, 对研究区 1986—2017 年水稻全生育期 (05-20—09-20) 降雨量从大到小依次排频, 选择干旱年 2010 (降雨频率为 90%) 作为分析年份。根据划分的尺度, 结合 Wu 等^[25]提出的回归水重复利用量计算方法及灌溉用水量计算方法, 基于改进 SWAT 模型模拟输出的不同情景结果, 分析计算不同节水情景不同尺度的 ψ_o 及 ψ_{new} 。

2.2.1 增加塘堰汇流面积的情景

增加塘堰汇流面积情景下不同尺度 ψ_o 及 ψ_{new} 随尺度的变化如图 3 所示, 同时, 为分析节水率随尺度变化规律的原因, 定义塘堰供水比例 (α_{pnd}) 为 $AIWC_{o,pnd}$ 占 $AIWC_{o,g}$ 的比例, 不同尺度的 α_{pnd} 如图 3 所示。

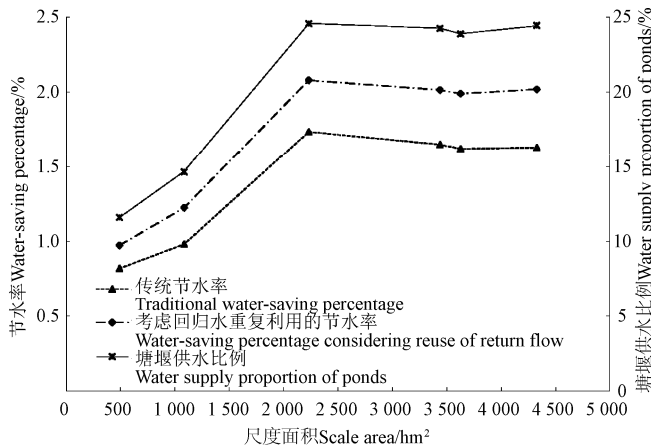


图 3 塘堰汇流面积增加情景的节水率及塘堰供水比例随尺度的变化

Fig.3 Changes of water-saving percentages and water supply proportion of ponds over different scales under the scenario of increasing drainage areas of ponds

由图 3 可知, 在增加塘堰汇流面积的节水情景下, ψ_o 及 ψ_{new} 随着尺度增大先增加再降低后趋于稳定, 并且 2 种节水率随尺度的变化趋势是一致的。该节水情景是增加塘堰汇流面积, 且塘堰水灌溉是实现入塘灌溉回归水重复利用的主要途径。由图 3 可知, 塘堰供水比例随尺度的变化趋势与 2 种节水率的基本一致, 即该节水情景下节水潜力随尺度的变化规律主要取决于不同尺度塘堰供水比例的变化。

此外, 各个尺度下的 ψ_{new} 均大于 ψ_o , 进一步由式 (8) 分析原因。

$$\begin{aligned} \psi_o - \psi_{new} &= \frac{WSP_o}{AIWC_{o,g,b}} - \frac{WSP_{new}}{AIWC_{new,g,b}} \\ &= \frac{AIWC_{o,g,b} - AIWC_{o,g,a}}{AIWC_{o,g,b}} \\ &= \frac{(AIWC_{o,g,b} - IRF_{r,all,b}) - (AIWC_{o,g,a} - IRF_{r,all,a})}{AIWC_{o,g,b} - IRF_{r,all,b}} \quad (8) \\ &= \frac{AIWC_{o,g,a} \cdot IRF_{r,all,b} - AIWC_{o,g,b} \cdot IRF_{r,all,a}}{AIWC_{o,g,b} \cdot (AIWC_{o,g,b} - IRF_{r,all,b})} \end{aligned}$$

式中 $IRF_{r,all,b}$ 和 $IRF_{r,all,a}$ 分别为节水措施实施前后灌区重复利用的灌溉回归水量, m^3 。

由式 (8) 分析, 增加塘堰汇流面积后, 塘堰拦蓄的水量会增加, 从而增加塘堰供水量, 同时漳河水库的供水量则相应减少, 但田间净需水量基本不变, 由于塘堰供水的灌溉水利用系数低于漳河水库供水, 因此塘堰供水的增加量小于漳河水库供水的减少量, 故导致 $AIWC_{o,g,a}$ 小于 $AIWC_{o,g,b}$; 同时由于增加了塘堰汇流面积, 入塘灌溉回归水增多, 从而入塘灌溉回归水的重复利用量将增加, 因此 $IRF_{r,all,a}$ 大于 $IRF_{r,all,b}$, 故 $\psi_{new} > \psi_o$ 。

2.2.2 提高渠系水利用系数的情景

提高渠系水利用系数情景下不同尺度的节水率 ψ_o 及 ψ_{new} 随尺度的变化如图 4 所示, 同时定义漳河水库供水比例 (α_{res}) 为 $AIWC_{o,res}$ 占 $AIWC_{o,g}$ 的比例, 其随尺度的变化见图 4。

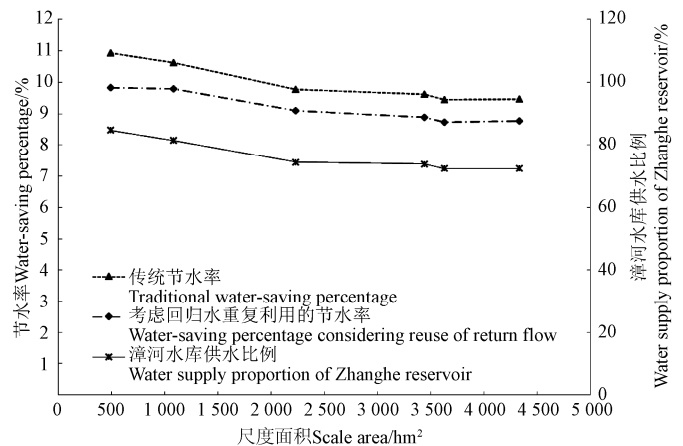


图 4 提高渠系水利用系数情景的节水率及漳河水库供水比例随尺度的变化

Fig.4 Changes of water-saving percentages and water supply proportion of Zhanghe reservoir over different scales under the scenario of increasing water utilization coefficient of canal system

图 4 表明, 在提高渠系水利用系数的节水情景下, 2 种节水潜力随着尺度逐渐降低并趋于稳定, 并且 2 种节水率随尺度的变化趋势是一致的。该情景为提高渠系水利用系数, 主要是减少了漳河水库传输灌溉水的损失量, 即该情景的节水潜力主要是来自于漳河水库的灌溉用水量减少而得, 节水率随尺度的变化规律主要与漳河水库供水比例有关, 且由图 4 还可知, α_{res} 随尺度的变化趋势与节水率的变化趋势基本一致, 因此该节水情景下节水潜力随尺度的变化规律主要取决于不同尺度漳河水库供

水比例的变化。

此外,各个尺度下的 ψ_{new} 均小于 ψ_o , 结合式 (8) 可知,提高渠系水利用系数后,由于减少了渠系水渗漏损失,漳河水库供水量减少,从而使 $AIWC_{o,g,a}$ 小于 $AIWC_{o,g,b}$ 。针对研究区域,由于漳河水库的灌溉水利用系数低于当地水源较多,其灌溉回归水的来源主要为漳河水库灌溉时的渠系水渗漏损失,该节水情景主要是提高了渠系水利用系数,因此产生的灌溉回归水量会减少,从而重复利用的灌溉回归水量会减少,即 $IRF_{r,all,a}$ 小于 $IRF_{r,all,b}$, 并且灌溉回归水重复利用量的减少幅度大于灌溉用水量的减少幅度,经计算,针对研究区尺度,灌溉回归水重复利用量的减少幅度为 17.5%,灌溉用水量的减少幅度为 9.5%,因此致使 $\psi_o > \psi_{new}$ 。

2.2.3 水稻节水灌溉模式的情景

相对于淹灌模式,间歇灌溉模式下不同尺度的节水率 ψ_o 及 ψ_{new} 随尺度的变化如图 5 所示,同时定义稻田面积占比 (β_{rice}) 为某尺度稻田面积占该尺度区域面积的百分比,其随尺度的变化见图 5。

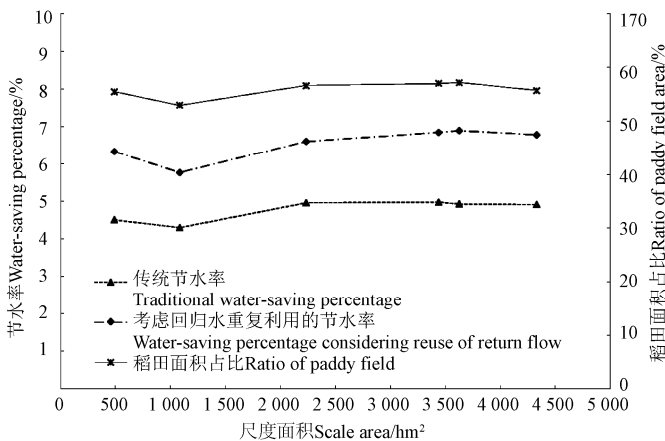


图 5 节水灌溉情景的节水率及稻田面积占比随尺度的变化

Fig.5 Changes of water-saving percentages and ratio of paddy field over different scales under scenario of water-saving irrigation

由图 5 可知,水稻采用间歇灌溉的节水灌溉模式后, ψ_o 及 ψ_{new} 随着尺度增大先减小再增大后趋于稳定,并且 2 种节水率随尺度的变化趋势是一致的。水稻节水灌溉模式是直接用于稻田上的节水措施,因此本次分析 β_{rice} 随尺度的变化,由图 5 可知, β_{rice} 随尺度的变化趋势与节水率随尺度的变化基本一致,因此该节水情景下节水潜力随尺度的变化规律主要取决于不同尺度实施水稻节水灌溉稻田面积占比的变化。

此外,各尺度下的 ψ_{new} 均大于 ψ_o , 结合式 (8) 可知,采用水稻间歇灌溉后,田间净灌溉需水量有所减少,从而导致毛灌溉用水量减少,即 $AIWC_{o,g,a}$ 小于 $AIWC_{o,g,b}$, 相应的重复利用的灌溉回归水量也会有所减少,但减少的幅度小于灌溉用水量的减少幅度,因此 $\psi_o < \psi_{new}$ 。

3 结 论

1) 本文利用改进 SWAT (Soil and Water Assessment

Tool) 模型构建漳河灌区杨树岗流域的分布式水文模型,并利用流域出口实测逐日径流、典型田块实测蒸发蒸腾量及灌水量、不同水源类型灌溉用水量统计值校正及验证模型,结果显示,改进 SWAT 模型能够有效模拟灌区水循环及灌溉用水量 ($R^2 > 0.80$, 纳什效果系数大于 0.80), 可用于灌溉回归水重复利用量及节水潜力的计算。

2) 定义并计算传统节水率及考虑回归水重复利用的节水率,探究节水潜力随尺度的变化规律,结果显示,增加塘堰汇流面积的节水情景下,2 种节水率均随着尺度增大先增加再降低继而趋于稳定,其随尺度的变化规律主要取决于不同尺度塘堰供水比例的变化;提高渠系水利用系数的情景下,2 种节水率均随着尺度增大逐渐降低并趋于稳定,其随尺度的变化规律主要取决于不同尺度漳河水库供水比例的变化;采用节水灌溉模式的情景下,2 种节水率均是随着尺度增大先减小再增大继而趋于稳定,其随尺度的变化规律主要取决于不同尺度水稻节水灌溉面积占比的变化。

3) 增加塘堰汇流面积及节水灌溉的情景下,传统节水率小于考虑回归水重复利用的节水率,提高渠系水利用系数的情景下,传统节水率大于考虑回归水重复利用的节水率。进一步分析 2 种节水率之间的关系,其主要由节水措施实施前后的灌溉用水量变化及灌溉回归水重复利用量变化共同决定。

灌溉用水量及灌溉回归水重复利用量的准确计算是节水潜力准确计算的基础及前提条件,本文采用改进 SWAT 模型模拟计算灌区不同水源类型的灌溉用水量,相对于典型监测而言更为准确,并且基于改进 SWAT 模型输出结果提出的回归水重复利用量计算方法也十分有效。然而,灌溉用水量及回归水量的实测数据相对较少,未来需继续监测数据或采用其他研究区对模型进行校正及验证。此外,由于研究区较大且试验工作量大,通常将单个田块实测的蒸发蒸腾量及灌水量用于模型校正,针对面积较小、稻田分布较均匀且田间措施基本一致的研究区而言,具有一定的可行性,但是若研究区较大或研究区土地利用分布空间差异性较大,则需在不同区域多个田块进行观测,从而增加模型校正的精度。

[参 考 文 献]

- [1] 沈莹莹, 吉晔, 张绍强. 我国农业用水量统计工作面临的问题及建议[J]. 中国水利, 2016(7): 50-52.
Shen Yingying, Ji Ye, Zhang Shaoqiang. Challenges faced by statistics of agricultural water use in China and advices[J]. China Water Resource, 2016(7): 50-52. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张义盼, 崔远来, 史伟达. 农业灌溉节水潜力及回归水利用研究进展[J]. 节水灌溉, 2009(5): 50-54.
Zhang Yipan, Cui Yuanlai, Shi Weida. Advance in agricultural irrigation water-saving potential and reuse of return flow research[J]. Water-saving Irrigation, 2009(5): 50-54. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王建鹏, 崔远来. 水稻灌区水量转化模型及其模拟效率分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 22-28.
Wang Jianpeng, Cui Yuanlai. Modified SWAT for rice-based

- irrigation system and its assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- [4] Seckler D. The new era of water resources management: From 'dry' to 'wet' water savings[R]. IWMI: IWMI Research Report 1, 1996.
- [5] Solomon K H, Davidoff B. Relating unit and subunit irrigation performance[J]. Transactions of the ASABE, 1999, 1(42): 115-122.
- [6] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 788-794.
- Cui Yuanlai, Tan Fang, Zheng Chuanju. Analysis of irrigation efficiency and water saving potential at different scales[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 788-794. (in Chinese with English abstract)
- [7] Keller A A, Keller J. Effective efficiency: A water use efficiency concept for allocating freshwater resources[R]. IWIM: IWMI Working Papers, 1995.
- [8] Molden D J. Accounting for water use and productivity[R]. IWIM: IWMI Books, 1997.
- [9] Perry C. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations[J]. Irrigation & Drainage, 2007, 56: 367-378.
- [10] 刘路广, 崔远来, 吴瑕. 考虑回归水重复利用的灌区用水评价指标[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 522-528.
- Liu Luguang, Cui Yuanlai, Wu Xia. Water use assessment indices under the influence of return flows in irrigation districts[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 522-528. (in Chinese with English abstract)
- [11] 崔远来, 龚孟梨, 刘路广. 基于回归水重复利用的灌溉水利用效率指标及节水潜力计算方法[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2014, 35(2): 1-5.
- Cui Yuanlai, Gong Mengli, Liu Luguang. Irrigation water use efficiency index and calculation method of water-saving potential with considering reuse of return flow[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2014, 35(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [12] Wu D, Cui Y L, Luo Y F. Irrigation efficiency and water-saving potential considering reuse of return flow[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 519-527.
- [13] 茆智. 节水潜力分析要考虑尺度效应[J]. 中国水利, 2005(15): 14-15.
- [14] Blanke A, Rozelle S, Lohmar B, et al. Water saving technology and saving water in China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2): 139-150.
- [15] 董斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉的尺度效应[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 833-839.
- Dong Bin, Cui Yuanlai, Li Yuanhua. Scale effect of water saving in rice-based irrigation system[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 833-839. (in Chinese with English abstract)
- [16] 崔远来, 董斌, 李远华, 等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 1-7.
- Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(7): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 54-58.
- Fu Guobin, Li Lijuan, Yu Jingjie, et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 54-58. (in Chinese with English abstract)
- [18] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 239-243.
- Pei Yuansheng, Zhang Jinping, Zhao Yong. Water saving potential in irrigation area of Ningxia Autonomous Region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 239-243. (in Chinese with English abstract)
- [19] 田玉青, 张会敏, 黄福贵. 黄河干流大型自流灌区节水潜力分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 40-43.
- Tian Yuqing, Zhang Huimin, Huang Fugui. Water-saving potential analyzes on Large-scale Gravity Irrigation Districts in the Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(6): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郭元裕. 农田水利学[M]. 第三版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [21] 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): 91-101.
- [22] Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical documentation, version 2009[R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [23] 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.
- Wang Zhonggen, Liu Changming, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Haihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese with English abstract)
- [24] 崔远来, 吴迪, 王士武, 等. 基于改进 SWAT 模型的南方多水源灌区灌溉用水量模拟分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 94-100.
- Cui Yuanlai, Wu Di, Wang Shiwu, et al. Simulation and analysis of irrigation water consumption in multi-source water irrigation districts in Southern China based on modified SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 94-100. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wu D, Cui Y L, Wang Y T, et al. Reuse of return flows and its scale effect in irrigation systems based on modified SWAT model[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 280-288.
- [26] Wu D, Cui Y L, Li D C, et al. Calculation framework for agricultural irrigation water consumption in multi-source irrigation systems[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106603.
- [27] 代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型: I. 模型构建的原理与方法[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 145-152.
- Dai Junfeng, Cui Yuanlai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT I. Principle and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- [28] Xie X, Cui Y. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1): 61-71.

- [29] Wu D, Cui Y L, Xie X H, et al. Improvement and testing of SWAT for multi-source irrigation systems with paddy rice[J]. *Journal of Hydrology*, 2019(568): 1031-1041.
- [30] 蔡学良. 基于 RS/GIS 技术和 OASIS 模型的灌区尺度节水策略研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- Cai X L. Research on Irrigation Area Scale Water Saving Strategy Based On RS/GIS Technology and OASIS Model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [31] van Liew M W, Vieth T L, Bosch D D, et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 12(2): 173-189.
- [32] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [33] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 4(2): 135-143.
- [34] Abbaspour K C, Vajdani M, Haghighat S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT[J]. *Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability*, 2007, 364(3): 1603-1609.
- [35] Moriasi D N, Arnold J G, van Liew M W. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.

Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model

Wu Di¹, Cui Yuanlai^{2*}, Huang Wenbo¹, Gong Lanqiang¹, Fan Guofu¹, An Lina¹, Li Dacheng¹, Yu Qian'an²

(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. State Key laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Agricultural water accounts for more than 60% of the total water consumption in China. Among them, crops irrigation accounts for about 90% of the total agricultural water consumption. Therefore, it is highly demanding to transform the water management in modern irrigation systems. Alternatively, water-saving transformation can be utilized to save irrigation water, where the Water-saving Potential (WSP) is a key parameter to evaluate the performance of system. It is also necessary to consider the scale effect of parameters. Taking the Yang-shu-dang (YSD) watershed in Zhanghe Irrigation System in Hubei Province of China as the study area, a distributed hydrological model was established in this study using the modified Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Some datasets were collected to validate the model, including the daily discharge at the outlet of YSD watershed in 2005-2009 and 2016-2017, the daily evapotranspiration in the typical experimental fields in 2007-2008 and 2016-2017, the irrigation water consumptions from the local water source (drainage channels and ponds) and the Zhanghe Reservoir in 2005-2008, and the irrigation amount in the typical experimental field in 2016-2017. The simulation performance of model was also assessed using the Relative Errors (RE), the coefficients of determination (R^2), and the Nash-Sutcliffe Efficiency coefficients (NSE). The results showed that the modified SWAT model presented an excellent performance to simulate the hydrological processes and irrigation water consumptions in a multi-source system. For example, the NSE of daily discharge reached 0.81 in the calibration period, whereas, that of daily evapotranspiration reached 0.90, and the RE of irrigation water consumption was only 2.75%. Moreover, the sub-basins nesting was used to divide the study area into six size scales. Three water-saving scenarios were set for the study area, namely the increased drainage area of ponds, the increased water utilization coefficient of canal system, and the rice water-saving irrigation. The traditional and new WSPs were calculated under different scenarios with the modified SWAT model, particularly considering the reuse of return flow in different scales, further to analyze the change rules. In the increased drainage area of ponds, the traditional and new WSPs first increased, then decreased, and finally stabilized with the increase of scale area, while the change rule depended mainly on the variation in water supply proportion of ponds over different scales. In the increased water utilization coefficient of canal system, the traditional and new WSPs gradually decreased, and then stabilized with the increase of the scale area. The reason was that the great variation in the water supply proportion of Zhanghe Reservoir over different scales. In rice water-saving irrigation, the traditional and new WSPs first decreased, and then increased as the scale increased, while finally remained stable. The change rule depended on the changes in the ratio of paddy fields at different scales. Finally, the relationship between two WSPs depended mainly on the changes in irrigation water consumption, and the reused amount of return flow at different scales before and after the implementation of water-saving measures. This study can provide decision-making basis and guidance for water management and water-saving reconstruction project layout in irrigation systems.

Keywords: irrigation; water resources; modified SWAT model; water-saving potential; scale effect; reuse of return flow