

渠井结合灌区农户灌溉用水模型的构建与应用

潘嘉培¹, 降亚楠^{1,2}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在水文模型中耦合准确模拟农户灌溉用水行为的模块可以构建更符合实际的灌区水循环模型, 可以定量计算农户灌溉用水对渠井结合灌区水循环的影响。以典型渠井结合灌区——陕西省宝鸡峡灌区为研究区, 采用问卷调查与访谈的方式收集了大量的农业生产和农户灌溉用水数据, 在深入分析灌溉用水影响因素互馈关系和渠井结合灌区水循环特征的基础上, 采用 Python 语言构建了渠井结合灌区农户灌溉用水模型(HCLU 模型), 该模型由水文、作物、农户生计和灌溉行为 4 个模块组成, 可以概化灌溉用水的各个环节并实现农户灌溉行为与水文物理过程之间的紧密耦合, 定量计算灌溉水源、灌溉定额、灌水时间和灌溉方式等对灌区水循环的影响, 模拟作物产量与灌溉量的关系, 为灌区水资源可持续管理和农业种植结构的调整提供强有力的技术支撑。

关键词: 渠井结合灌区; 农户灌溉用水模型; Python

中图分类号: S274.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0293-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.06.040

Development and Application of a Social Hydrological Model Considering Farmers' Irrigation Behavior in Canal-well Combined Irrigation District

PAN Jiawei¹, JIANG Yanan^{1,2}

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100; 2.Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering in

Arid and Semiarid of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: A better hydrological model can be developed by coupling and accurately simulating the behavior of farmers' irrigation, which can be adopted to quantify the influence of farmers' irrigation on the hydrological cycle in canal-well combined irrigation district. In this paper, Baojixia irrigation district in Shaanxi Province was taken as an example, the question naire and interview methods were adopted first to collect data regarding to agricultural production and farmers irrigation practice. Then the factors affecting irrigation water demand and hydrological processes were analyzed. Finally, a Hydrological-Crop-Livelihood-Utility Model (HCLU) was developed by using Python language, which included hydrological, crop, livelihood and utility modules. In this model, hydrological processes, irrigation practices and crop management had been fully connected to quantify the impacts of irrigation on hydrological cycle and relationship between crop yield and irrigation. This model could be very helpful in terms of providing strong technical support for the sustainable management of water resources in the irrigation district and the adjustment of agricultural planting structure.

Keywords: canal-well combined irrigation district; social hydrological model considering farmers' irrigation behavior; Python

灌溉是我国现代农业建设不可或缺的首要条件,也是干旱半干旱地区生态环境改善的有效途径。大型灌区对我国北方农业的高产、稳产乃至全国的粮食

安全都具有举足轻重的地位^[1]。20 世纪 70 年代以来,在原渠灌设施的基础上,我国北方部分灌区大力发展井灌,以井灌代替排水,形成了渠井双灌模式^[2]。

收稿日期: 2021-04-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400305, 2016YFC0401306); 国家自然科学基金项目(51409219)

第一作者: 潘嘉培(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事灌区水循环模拟研究。E-mail: pjpwnwafu@163.com

通信作者: 降亚楠(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: yananjiang@nwafu.edu.cn

地表水和地下水联合利用促进了优质、高产、高效农业的发展^[3],对保障灌区生态环境的良性循环和经济社会的可持续发展发挥了重要作用。灌区是气候变化的敏感区和人类活动的密集区,渠井结合灌区的水循环受诸多人类活动的影响^[4],因此过程复杂且难以量化。传统的研究方法(如统计模型)^[5]可以得到水量平衡关系,但无法定量计算各影响因素对水循环的影响,难以做到对地下水循环过程的准确描述^[6]。

随着计算机技术的发展和灌区水资源管理水平的提高,模型在水循环机理研究和水资源管理利用方面发挥着越来越重要的作用^[7]。灌区大规模引、抽、灌、排等人类活动显著改变了灌区水循环各环节的水分通量,因此必须定量考虑人类活动的影响^[8-9]。Srinivasan 等^[10]建议将用水户的社会行为纳入水循环的建模范围,在此基础上进一步发展水文模型,考虑人类行为与水文过程的密切作用,构建社会水文学模型以加深对水循环的了解^[11-12],又有助于研究社会和水文系统之间的协同演化规律与驱动机制,更全面地理解水循环的外部影响因素与内部各环节的反馈机理^[13];Kumar 等^[14]探讨了如何将人与水之间的关系联系起来,以管理当地的用水需求,同时减轻对水文循环的不利影响;Nazemi 等^[15]认为,目前大量模型在代表人类用水需求的能力相当有限,强调了传统水资源管理方法的局限性。当前尽管有部分考虑人类活动的社会水文学模型,但针对渠井结合灌区考虑农户灌溉用水的社会水文学模型较少。

我国部分灌区由于渠灌水费高于井灌水费,农户选择大面积开采地下水灌溉,致使渠道长期不行水而失去作用^[16]。因此农户的灌溉行为对于作物产量及收入产生重大影响,造成种植结构以粮食作物为主向经济作物转变的趋势,进而影响灌区的灌溉用水需求^[17-19]。定量描述这一过程需要大量的作物种植、农户收入、灌溉用水和农业管理成本等数据,目前灌区水循环模拟中所用到的取用水数据大都通过统计资料自上而下获得,所得数据的时空精度和分辨率较低,缺乏对区域实地情况的了解和社会资料的支撑,无法满足现阶段分布式水文模型的需求^[20],因此有学者提出通过构建社会水文学模型来解决渠井结合灌区的水循环问题。英国帝国理工学院的 O'Keefe 等^[21-22]通过“自下而上”的方法进行水资源的研究分析,着重于农户的行为和决策,提出在模型框架中纳入农户的行为可以增进农业用水背后复杂过程的理解,从农户的角度分析不同情景对灌溉的相关决策与行动,能帮助确定更合适的应对机制和管理策略,基于印度灌区的野外调查提出了一个包括农民灌溉用水行为的社会水文学框架。与国外灌区相比,我国灌

区农户用水行为在灌溉水源的选择、灌溉用水方式、灌区水利设施修建等诸多方面存在差异,因此需要结合我国灌区的实际情况,在充分野外调研的基础上构建适合我国灌区实际的农户灌溉用水模型。

目前国内的渠井结合灌区水资源管理研究中考虑农户的灌溉用水行为的较少,而对于农户生计的研究,人们更多地关注于不同水价政策影响的差异^[23],侧重于节水设备与技术的研究,而对于农户用水行为及其对区域水循环影响的研究涉及较少。本文通过关注农户灌溉用水行为和灌区水循环之间的互馈关系,通过对典型渠井结合灌区的野外实地调研,在充分了解灌溉用水影响因素互馈关系的基础上,基于 Python 编程语言构建了渠井结合灌区农户灌溉用水模型(Hydrological-Crop-Livelihood-Utility Model,HCLU 模型)。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省宝鸡峡灌区位于关中平原西部(106°51'—108°48'E,34°09'—34°44'N),位于温带大陆性季风气候半湿润易旱区,总面积 23.55 万 hm²,有效灌溉面积 18.8 万 hm²,年平均气温 13.1℃,年平均降水量 561.7 mm。从渭河左岸引水,受益范围有宝鸡、杨凌、咸阳、西安 4 个市(区)的 14 个县(区),总人口 250 万,农业人口 190.6 万。灌区内林业资源丰富,矿产资源较少,农业经济占主要成分,主要农作物为小麦、玉米,多年亩均粮食产量为 790 kg,是陕西省粮食及经济作物的重要生产基地。灌区农田灌溉主要采用渠井结合灌溉模式,根据渠道来水和农作物需水情况,同一田块可以选择采用渠水自流灌溉和抽取井水灌溉 2 种灌溉方式(图 1)。

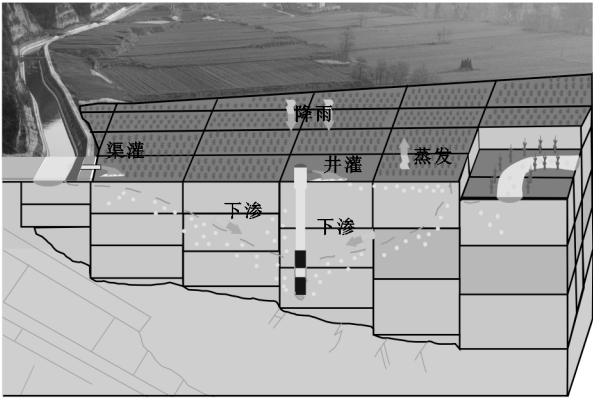


图 1 宝鸡峡灌区渠井结合灌溉示意

本研究采用问卷调查与访谈法,在宝鸡峡灌区的咸阳、宝鸡、礼泉、扶风、乾县 5 个地区的常兴、杏林、信义、段家湾、贞元、北昌、板抽、南韩、南市、马连、南寨、阡东、双照、帝王、红旗 15 个管理站和 200 个农户进行访谈。通过收集典型农户作物种植情况:土地面积、作物类型、产量、经营情况;灌溉水源情况:渠灌作

物类型及用水量、井灌作物类型及用水量、灌溉成本、灌溉方式等内容。野外调查过程中采用多种措施确保调查资料的真实准确,在调查过程中,依据相关标准来选择典型农户,种植作物具有典型性,农作物包括冬小麦和夏玉米;有多年农田灌溉经验,了解灌溉情况。

1.2 灌溉用水影响因素分析

(1)灌溉决策取决于农户所处的地理位置和水源条件。农户通常遵循传统的灌溉实践模式,在符合自然规律的最佳时间进行灌溉。灌区种植的作物主要有小麦、玉米、果树等,灌区管理局按照制定的灌溉制度在相应的时段开闸放水,放水量由各灌溉管理站结合农民的灌溉需求统计后上报申请。

(2)渠井结合灌溉。灌区灌溉设施完善,部分区域农户可根据需要选择采用地表水或者地下水进行灌溉。对于小麦、玉米等粮食作物,为了适时更好地满足作物的用水需求,农户根据渠道来水情况和渠系设施完好程度,倾向于选择渠水灌溉。

(3)水价。水价对农户的灌溉用水行为产生一定影响,水价补贴会提高农户用水积极性,适当的水价调整对农户种植结构及土地流转后节水灌溉设施的

推广产生影响。

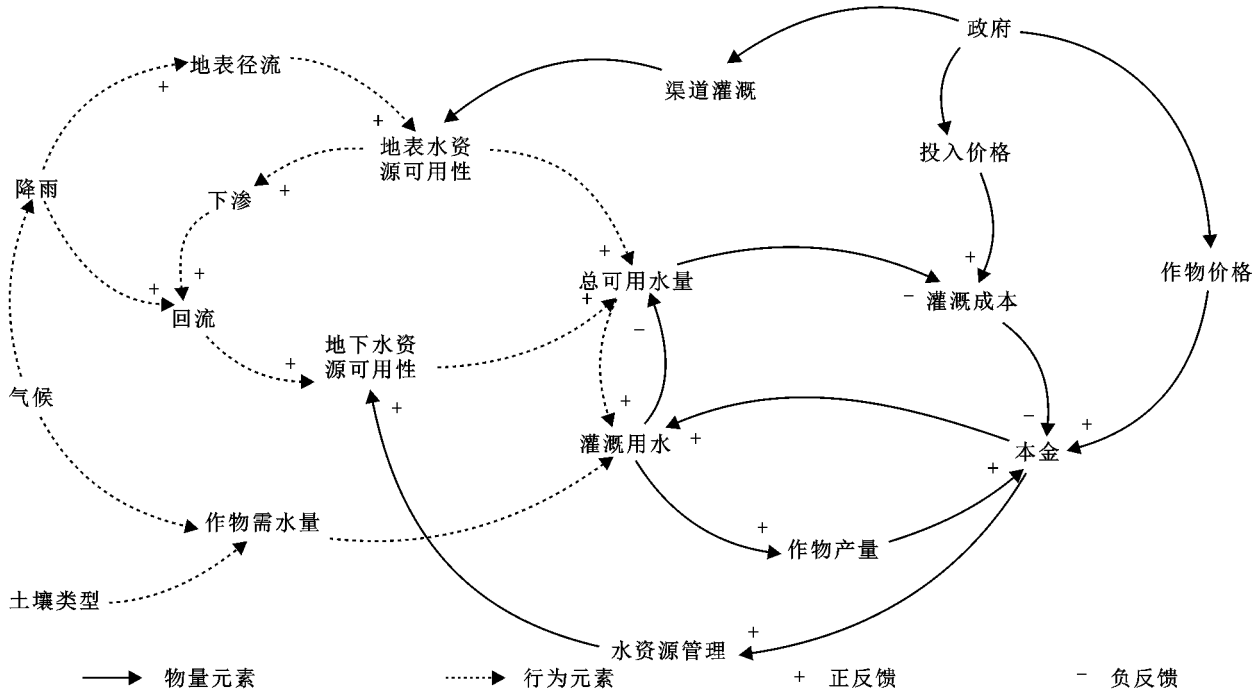
(4)渠系工程维修养护。渠系渗漏,年久失修,造成灌溉用水的严重浪费,但渗漏的水量在一定程度上补给地下水,使地下水得到涵养。渠系工程维修养护是节约水资源的重要途径方法,同时为位于渠道附近的农户提供强有力的保障,使其更受益于渠道灌溉,进而为粮食丰收和增加收入奠定基础。

(5)农户灌溉用水量。农户每年灌溉都会记录其田间用水时长及用水总量用于支付灌溉水费。

(6)地下水位影响。井灌区地下水位随着灌溉时间的增加而降低,随着灌溉面积的增大和渠灌比例的上升,灌区地下水位有所回升。部分农户井灌的经验表明,井灌区农户的灌溉时间随着地下水位的下降而增加。

(7)为解决因渠道损坏而导致渠道来水不足和灌溉水源缺乏时,政府扶持钻凿新井或增加井深。部分土地流转后种植面积较大的农户已采用节水灌溉以降低灌溉成本。

在对调查结果中农户灌溉用水影响因素分析的基础上,绘制了渠井结合灌区灌溉用水影响因素互馈关系图(图 2)。



1.3 概念模型构建

为了更好地定量描述渠井结合灌区的农户灌溉用水过程,参考 O’Keeffe 等^[22]在印度某灌区构建的模型,针对宝鸡峡灌区渠井结合的实际情况对相关模块进行修改,构建了包括水文模块、作物模块、农户生计模块和灌溉行为模块 4 个模块的渠井结合灌区农户灌溉用水模型 (Hydrological-Crop-Livelihood-Utility Model)(图 3)。

1.3.1 水文模块 水文模块主要反映作物根系所在土层的水量平衡变化与作物灌溉需求之间的水量平衡,可用公式(1)~公式(7)表示。

公式(1)表示作物根区水量平衡。

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \tag{1}$$

式中:TAW 为根区土壤中能蓄存的水量(mm); θ_{FC} 和 θ_{WP} 分别为根区土壤的田间持水量和凋萎系数; Z_r 为最大根区深度(mm)。

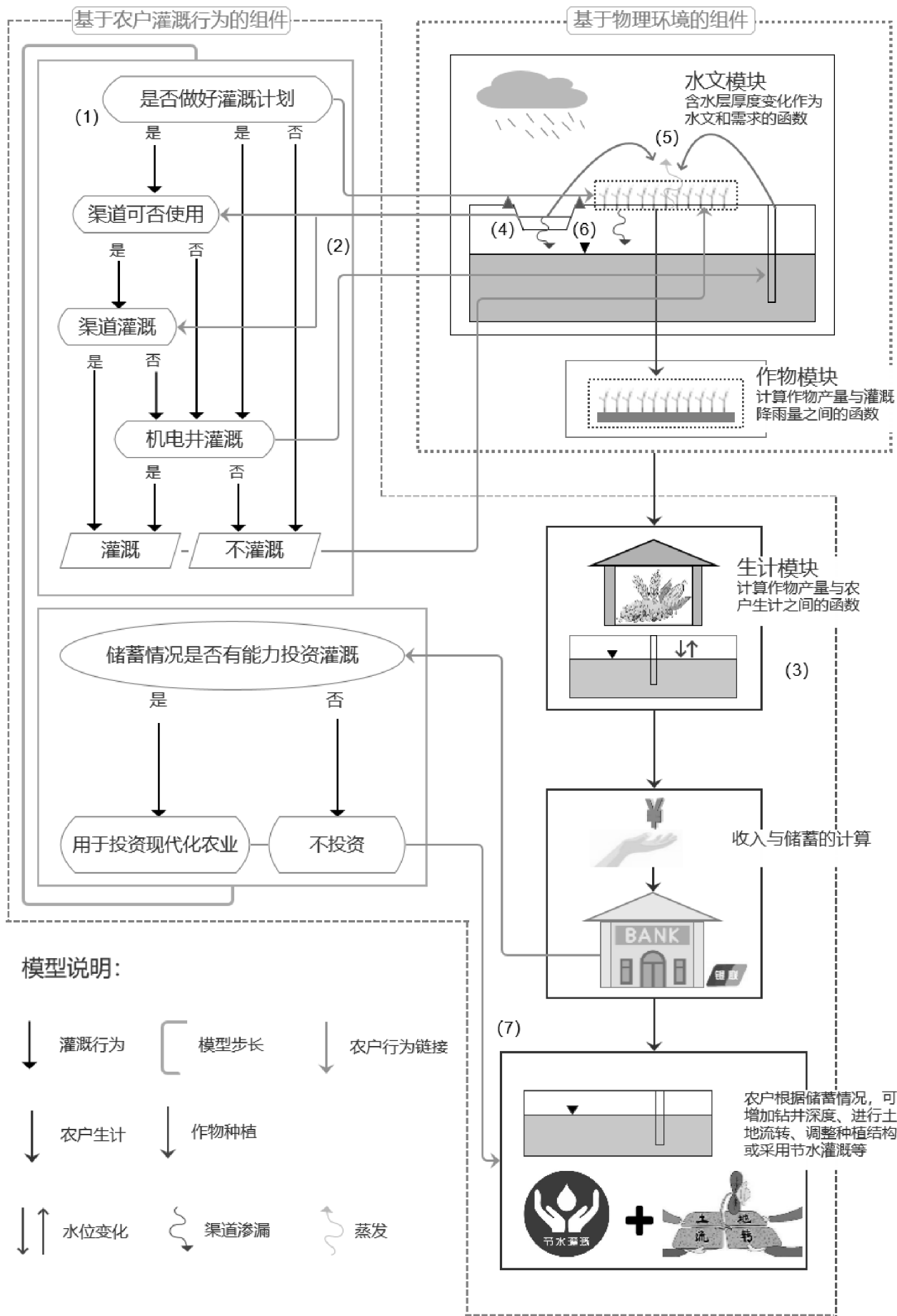


图 3 渠井结合灌区农户灌溉用水模型

公式(2)表示作物利用根区水分的情况。 $RAW = (1 - \rho)TAW$ (2)

式中:RAW 为某种作物能够利用的水,表示在土壤水分不足阻碍植物生长之前从根区土壤能吸收的水量(mm); ρ 为特定作物的消耗因子。

公式(3)表示根区土壤水分的日水量平衡。

$$\frac{dD_r}{dt}(t,T)=ET_c(t,T)+R(t,T)-(P(t,T)-RO(t,T))-I(t,T) \tag{3}$$

式中: D_r 为根区水分的日变化量(mm); ET_c 为实际作物蒸散量(mm); R 为补给量(mm); P 为降水量(mm); RO 为地表径流(mm); I 为灌溉量(mm); t 表示时间(d); T 表示时间(a)。

公式(4)表示作物蒸发蒸腾。

$$ET_c(t,T)=K_s(t,T)K_c(t,T)ET_0(t,T) \tag{4}$$

式中: K_c 为随作物生长变化的作物系数; K_s 为水分胁迫系数; ET_0 为参考蒸散量(mm)。

其中水分胁迫系数 K_s 可用公式(5)计算:

$$K_s(t,T)=\frac{TAW-D_r(t,T)}{(1-\rho)TAW} \tag{5}$$

当根区土壤含水量超过田间持水量时,有一定的水量渗漏补给含水层:

$$R(t,T)=\begin{cases} -D_r(t,T)/\Delta t, & \text{if } D_r(t,T)<0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

经调查,灌区内各农户的灌溉方式有渠井结合灌溉、井灌、渠灌和无灌溉 4 种情况,呈现一定的区域性,渠水灌溉有保障的地区农民多采用渠灌,经济作物种植面积大的区域由于对灌水时间要求较高,常采用地下水灌溉,部分劳动力缺乏的农户灌溉积极性不高而选择不灌溉来降低成本,其余大部分渠、井设施完善的区域多选择渠井结合灌溉的方式。灌溉方式将影响根区土壤和地下含水层的水量平衡,灌溉过程用公式(7)表示。

$$\frac{dH}{dt}(t,T)=\begin{cases} R(t,T)+l\times V(t,T)-I(t,T) & \text{渠井结合灌溉} \\ R(t,T)-I(t,T) & \text{井灌} \\ R(t,T)+l\times V(t,T) & \text{渠灌} \\ R(t,T) & \text{不灌溉} \end{cases} \tag{7}$$

式中: H 为含水层水量(mm); V 为渠道中保持的水量(mm); l 为渗漏系数。渠井结合灌溉方式是同时采用渠水和机电井抽水灌溉,如将井水统一抽至渠道(斗渠)再由渠道统一输送进行灌溉;井灌指采用机电井抽水灌溉,井水直接通过农渠或毛渠进入田间;渠灌指从渠首引河道水进行灌溉。

1.3.2 作物模块 作物模块主要用来计算作物产量,由作物产量与蒸散量之间的关系来计算,见公式(8)。

$$(1-\frac{Y_a(T)}{Y_x(T)})=K_y(1-\frac{\sum_{t=d_s}^{d_h} ET_c(t)}{\sum_{t=d_s}^{d_h} ET_x(t)}) \tag{8}$$

式中: Y_x 为最大产量(500 g/hm^2); Y_a 为实际产量(500 g/hm^2); K_y 为产量响应因子; ET_x 为最大蒸散量(mm); ET_c 为实际作物蒸散量(mm); d_s 为播种日期; d_h 为收割的日期。 Y_x 取自在宝鸡峡灌区实地调查的数据,水源的供应与使用是对农业生产的最大限制。调查数据包含农药肥料的影响、种子品种的改良与作物病害,还有其他未考虑的因素不同程度地限制农作物的生产。

1.3.3 农户生计模块 该模块主要计算农户净收入和灌溉之间的关系,考虑的收入主要为农产品销售,支出包括农业成本支出和灌溉支出。农户净收入是根据农业收入与农业支出之差来计算,见公式(9)。

$$L(T)=m(T)-z(T) \tag{9}$$

式中: L 为农户净收入(元); m 为农业收入(元); z 为农业支出(元)。

农业收入仅限于农户从农业上获得的作物销售收入,见公式(10)。

$$m(T)=\sum_{c=1}^n Y_{ac}(T)q_c(T)A_c(T) \tag{10}$$

式中: n 为灌区农户种植作物的种类; q_c 为农作物 c 的价格(元); A_c 为农作物 c 面积(hm^2)。

农业支出主要考虑农户在作物种植过程中的成本支出,见公式(11)。

$$z(T)=(z_w+z_s+z_p+z_f+z_e-z_a)\cdot A \tag{11}$$

式中: z_w 为灌溉用水成本(元); z_s 为支付种子的成本(元); z_p 为支付农药的成本(元); z_f 为支付化肥的成本(元); z_e 为支付雇工的成本(元); z_a 为政府补贴(元)。

1.3.4 灌溉行为模块 农户的灌溉行为涉及到以上 3 个模块,如水文模块的公式(7)和农户生计模块的公式(9)~公式(11),因此灌溉行为模块构成该模型框架的主体,贯穿于水文模块、作物模块和农户生计模块 3 部分(图 3)。该模块实现了农户行为与水文物理过程之间的紧密耦合。

1.4 模型开发

1.4.1 模型开发工具 HCLU 模型(Hydrological-Crop-Livelihood-Utility Model)采用 Python(3.8.2)语言开发,其中用到的扩展程序库(包)主要有:支持大量数组与矩阵运算的 Numpy(1.18.4)、用于数据处理和和分析的 Pandas(1.0.3)和用于图形绘制的 Matplotlib(3.2.1)和 Seaborn(0.11.1)。

1.4.2 模型输入数据 HCLU 模型的输入数据和需要确定的相关参数主要有日降水数据、作物类型、作物价格、灌溉制度、地下水埋深、田间持水量、凋萎系数、渠道渗漏率等,模型输入数据主要通过野外调查问卷和查阅资料获得。部分模型参数初值需要根据野外调研资料进行率定,HCLU 模型目前版本(v1.0)

需要通过手工调参来校准。通过对比模拟和实测的地下水位和作物产量数据来确定需要校准的参数,通过调研资料和模型参数率定的本模型在宝鸡峡灌区的参数和输入数据见表 1。以陕西省宝鸡峡灌区为例说明模型的构建和应用过程。

2 结果与分析

2.1 模拟过程

本文采用 HCLU 模型模拟了 1 个生长周期下冬小

麦和夏玉米的水循环过程。自然环境和农户的灌溉行为在作物生长过程中相互影响,通过定义参数将生物物理现象进行定量描述。模拟过程通过模块实现。

水文模块通过读取日降水量实测值和实地调查数据获取的灌溉时间和灌溉量等数据进行迭代运算,可输出实际作物蒸散量 ET_c 、补给量 R 、水分胁迫系数 K_s 、根区水分变化量 Dr 、每日根区枯竭变化 dDr/dt 和含水层厚度变化值 H 。

表 1 宝鸡峡灌区 HCLU 模型输入数据和参数取值

参数	宝鸡峡灌区取值	参数	宝鸡峡灌区取值
降雨径流/%	5	凋萎系数	0.06
渠道渗漏率/%	35	冬小麦最大根深/m	1.25
田间持水量	0.22	夏玉米最大根深/m	0.95
1 类井深/m	11	冬小麦作物系数	0.93
2 类井深/m	54	夏玉米作物系数	0.65
渠灌水费	0.326	冬小麦最大产量/(500 g · hm ⁻²)	15435
25 m 扬程以下抽水/(元 · m ⁻³)	0.348	夏玉米最大产量/(500 g · hm ⁻²)	16275
25~40 m 扬程抽水/(元 · m ⁻³)	0.369	平均种植面积/(hm ² · 户 ⁻¹)	0.2
40 m 扬程以上抽水/(元 · m ⁻³)	0.380		

作物产量模块计算得到的农产品销售是农户农业生产收入的主要来源,水文模块中获得的农户灌溉量在农户生计模块中用来计算作物灌溉的水费支出。再通过 Seaborn 库将产量和收入进行可视化处理,可以直观看出冬小麦和夏玉米产量对于农户生计的影响。

作物模块在水文模块输出的实际作物蒸散量 ET_c 基础上,输入农户亩均冬小麦、夏玉米的实际产量和最大产量,经迭代计算后输出冬小麦、夏玉米各自生长周期中的最大作物蒸散量 ET_x 之和 $\sum ET_x$ 。并利用辅助功能模块中的绘图功能将冬小麦、夏玉米生长周期中的实际作物蒸散量之和 $\sum ET_c$ 与产量的函数关系进行可视化输出。

灌溉行为模块是 HCLU 模型的核心模块。在水文模块中,灌溉行为通过影响灌溉量 I ,从而影响含水层厚度 H ;在作物模块中,灌溉行为通过影响作物的实际蒸散量 ET_c 来影响作物产量;在农户生计模块中,农户的净收入受到作物产量的收入以及灌溉量水费支出的影响。

2.2 模拟结果

本模型的输出结果主要有日地下水位变化量、作物产量和农户收入 3 部分,为了测试模型模拟渠井结合灌区的能力,本文共随机进行了 400 次不同初始值的模拟,为了确保模拟结果的可重复性,在每次模拟中均设置了相应的随机数种子。

2.2.1 地下水位变化模拟 为了评估不同灌溉模式对地下水位的影响,HCLU 模型通过设置不同的参数,输入降水量和通过灌溉行为模块分析得出灌溉量

等数据,对降雨量加入不同的正态分布噪声以及对灌溉量进行不同的正态分布取样的方法,模拟了 4 种灌溉模式(渠井结合灌溉、地下水灌溉、渠道灌溉和不灌溉)下模型计算的日地下水位变化规律。由图 4 可知,虚线为灌区实测地下水位变幅,实线为相应灌溉方式模型计算得到的 400 次地下水位变化的中位数,阴影区域是模型 400 次迭代运算得到的地下水含水层厚度变化范围。

从图 4 可以看出,在模型设定为渠井结合灌溉方式下,中位数结果(实线)的日变化最大值为 50.43 mm,最小值为 -7.61 mm,日平均变化范围(阴影区域)为 34.58 mm。模型得到的含水层厚度变化范围与实测的含水层厚度变化十分吻合,实测值在阴影区域内的占比为 88.8%,这与调查的区域为渠井结合灌区十分吻合,少数不在范围内的原因可能是由于人类的活动,证明了本文所构建模型计算结果的正确性。

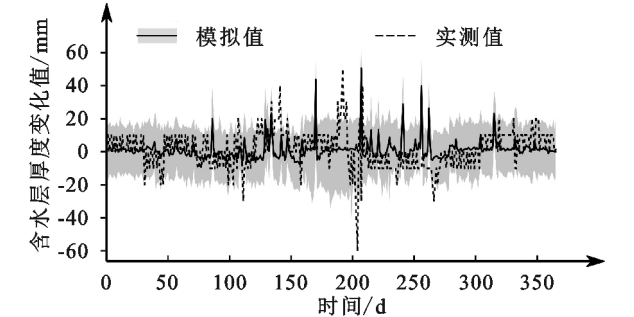


图 4 渠井结合灌溉含水层厚度变化模拟结果与实测数据对比

从图 5 可以看出,在设定灌溉方式为井灌的情况下,中位数结果(实线)的日变化最大值为 45.72 mm,最小值为 -12.41 mm。日平均变化范围(阴影区域)为 11.45 mm,在预测结果准确的基础上相比于渠井

结合模拟结果更有优势。但实测值在阴影区域内的占比为 30.4%，与实测值有很大的出入，相较于渠井结合重合的区域吻合度较低。说明采用井灌抽取地下水明显影响地下水动态。图 5 与图 4 的模拟结果对比中，不同初始值得到地下水含水层变化范围远小于渠井结合的变化范围，这是由于井灌这种灌溉方式对于地下水的补给远不如渠灌，通过渠道直接下渗的水量将大大减少，并且模拟的含水层厚度变化的结果主要位于负值区域，与实测的变化值相差较大。

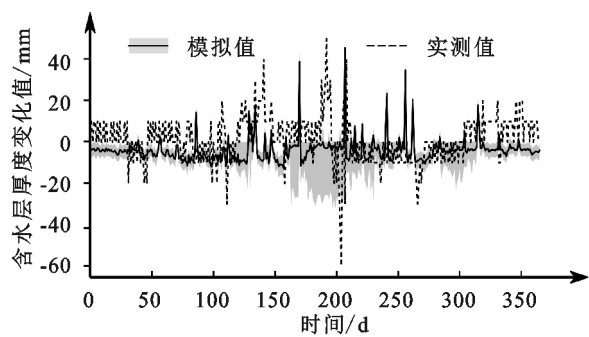


图 5 井灌含水层厚度变化模拟结果与实测数据对比

图 6 在模型灌溉方式设定为渠灌的情况下，其中位数结果(实线)的日变化最大值为 54.66 mm，最小值为 -4.29 mm。相比于井灌，渠水灌溉补给地下水明显改变了地下水水位，实测值包含在模型计算所得的阴影区域中的占比为 91.5%，与实测结果的吻合程度远高于井灌模拟结果，表明在该渠井结合灌区内，渠灌这一灌溉方式占主导地位，这符合实际调查结果。模拟的日平均变化范围(阴影区域)为 50.00 mm，而渠井结合的日变化范围仅为 34.58 mm，对比图 4 与图 6 中的阴影区域，渠井结合灌溉预测的地下水变化相对于渠灌，预测结果更为准确。

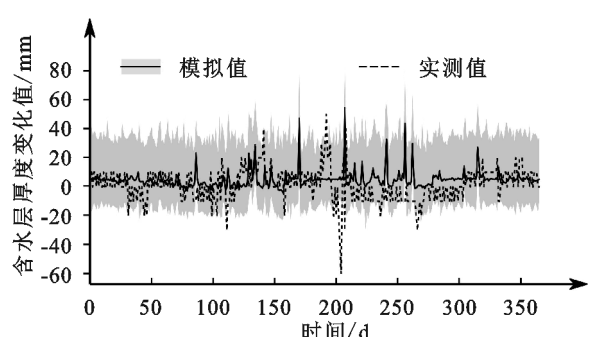


图 6 渠灌含水层厚度变化模拟结果与实测数据对比

在渠灌情况下，加入不灌溉极端情景模拟。从图 7 可以看出，由于不灌溉，地下水几乎不消耗，而渠水下渗补给地下水，因此模拟得到的范围位于正值区域。图 7 中模拟值的日变化最大为 47.25 mm，最小为 -10.33 mm，模拟的日平均变化范围(阴影区域)为 35.07 mm，实测值包含在模型计算所得的阴影区域中的占比较高，为 79.7%，模拟较为吻合，与渠井灌

溉情况占接近。

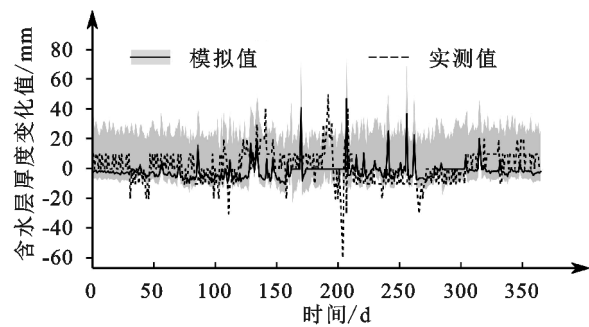


图 7 不灌溉含水层厚度变化模拟结果与实测数据对比

2.2.2 作物产量模拟 实地走访调查表明，宝鸡峡灌区农户种植的主要农作物是冬小麦和夏玉米，因此本研究中 HCLU 模型的作物模块只假设农户种植以上 2 种作物。根据作物生长周期(夏玉米为 6 月 11 日至 10 月 10 日，冬小麦为 10 月 11 日至翌年 6 月 10 日)，分析作物参数，对不同作物生长周期内的实际蒸散量(ET_c)进行求和($\sum ET_c$)。结合实地调查获取的农作物最大产量与实际产量，代入公式(8)中得到所需的参数 $\sum ET_x$ 。为了测试计算所得最大蒸散量这一结果的合理性，分别模拟了 400 次不同降雨量与灌溉量的计算结果，取其中 100 次的实际蒸散量计算日最大蒸散量。

计算所得实际蒸散量与冬小麦和夏玉米产量的关系见图 8。图 8 中实际蒸散量是作物在生长周期内的总蒸散量。随机选取 100 次模拟结果进行图形绘制，实线为模拟结果的平均值，最大产量取实地调查数据均值。在模拟中，对于农户而言最重要的作物产量，并且在模拟过程中充分考虑农户现实的支出因素，对农户的净收入与其种植产量的关系进行了计算。为了量化作物模块模拟结果的准确性，对 2 种作物进行归一化均方误差(RMSE)计算见公式(12)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i^2}} \quad (12)$$

式中： y_i 为模拟的作物产量； $\hat{y}_i$ 为模拟结果的线性回归值； n 为模拟次数。

模拟结果中，玉米产量的归一化均方误差为 3.31%，小麦产量的归一化均方误差为 4.23%，两者均方误差的值都较小，且结果较为接近，表明作物模块通过实际蒸散量预测作物产量的准确性。模型模拟结果显示，宝鸡峡灌区作物产量与实际蒸散量呈正相关，且在相同的实际蒸散量下，玉米的产量略高于小麦的产量。实际蒸散量的增加可以通过增加田间灌溉量，即灌溉量与作物产量间为正比关系，通过增加田间灌溉量可以相应增加作物产量。

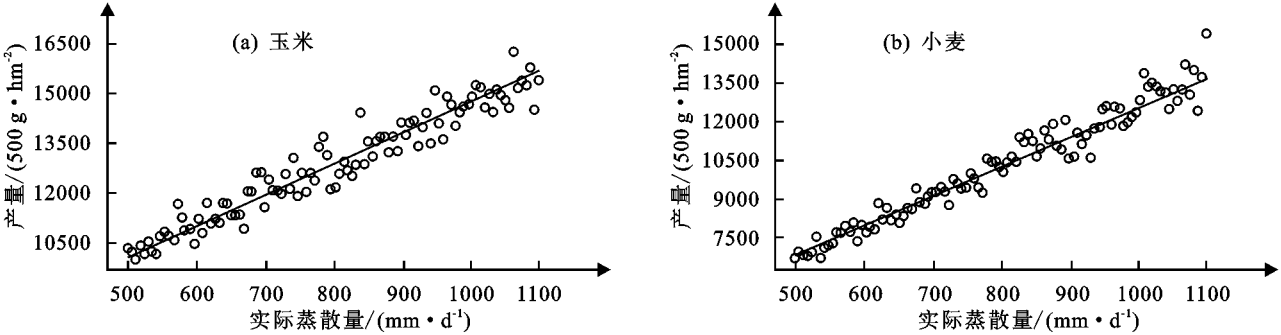


图 8 玉米、小麦产量与实际蒸散量关系

2.2.3 农户生计模拟 在农户生计模块中,农户的农业净收入为种植主要作物(冬小麦、夏玉米)收入减去每户(0.2 hm²)成本开支,如灌溉费用和种子、农药、化肥、雇工等成本,这些支出费用的参数来自实地调查的结果。表 2 是实地调查的部分农户产量收入,结合作物模块模拟得到的产量范围。

表 2 宝鸡峡灌区农户的作物产量与净收入(部分)

样本	小麦产量/ (500 g·hm ⁻²)	玉米产量/ (500 g·hm ⁻²)	净收入/ (元·hm ⁻²)
农户 1	15000	12000	20995
农户 2	13500	12000	20350
农户 3	16500	10500	21560
农户 4	15000	11250	20985
农户 5	13500	9000	16770
农户 6	12000	10500	17080
农户 7	12750	12000	19625

从图 9 可以看出,冬小麦和夏玉米产量的增加均会增加农户净收入水平,在相同灌溉量的情况下,小麦产量低于玉米产量。模拟结果得出,农户种植 0.2 hm²的净收入最少为 1 980 元,最多为 4 750 元,与表 2 的结果对比分析得出,实地调查的收入均在农户生计模块模拟范围内。与水文作物模块综合分析得出,一定范围内增加灌溉使实际蒸散量增加的情况下,相应作物的产量也会相应增长,农户可以通过增加灌溉量增加其农业收入,当作物需水量达到饱和,增加灌溉则会使得水费超支。而当土壤蒸发和植物蒸腾导致根区土壤水分不足时,农户可选择从渠道引水或机井抽水进行灌溉,灌溉后超过田间持水量的部分会有一部分下渗补给地下水,作物经过灌溉后产量增加,农民收获并售卖后获得收入。农户想要增加净收入可以通过减少农户生计模块中分析的支出,如提高灌溉效率、降低灌溉量、合理分配灌溉时间和节省水费等方式来提高收入^[24]。

3 讨论

土地利用和种植结构对灌区水文过程有重要影响,由于我国实行家庭联产承包责任制,农户地块的

碎片化和不同作物种植是我国农业的显著特征,因此难以通过统计数据“自上而下”获取数据。本研究通过野外实地调研,采用问卷调查和访谈的方法“自下而上”获得灌区的供用水信息,在此基础上基于 Python 语言构建了 1 个渠井结合灌区农户灌溉用水模型。相比传统分布式水文模型的研究方法,如代俊峰等^[25]利用 SWAT 对灌区水循环进行模拟,HCLU 模型虽然在物理过程模拟方面存在一定的局限性,但其中耦合了社会水文学的模块,是一种有效和高效收集水文信息的方法,同时考虑农户用水习惯改变对水循环的反馈过程,从而更真实地模拟灌区的水循环过程,也为灌区水循环模拟提供了新的思路。相对于复杂的灌区水文模型,本文所开发的模型抓住了渠井结合灌区中灌溉影响地下水位这一核心问题,以根区水量平衡为基础,考虑了不同灌溉方式和灌水量对作物产量和地下水的影响,且增加了社会学因素,如考虑了农户收支和政府补贴对灌区灌溉水源的影响(政府补贴修建机电井可改变农民的灌溉习惯、增加井灌的面积、降低地下水位)。本模型原理清楚,结构简单,需要的基础数据相对较少,但功能强大,可以模拟气候变化和人类活动(不同渠井用水比例、种植结构的变化,节水灌溉技术的推行,土地流转和粮补政策实施)等对灌区水地下水位的影响。

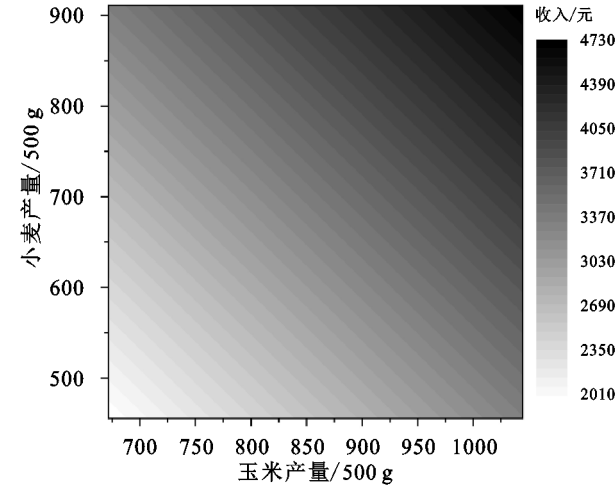


图 9 作物产量与农户净收入关系

本研究开发的 HCLU 模型在 O’Keeffe 等^[20]的模型基础上,进一步考虑我国渠井结合灌区灌溉农业的特点进行了修改和完善。通过设置 4 个灌溉情景,定量计算了灌溉行为对地下水位的影响,验证了模型的可行性。本文重点介绍了 HCLU 模型的原理和开发过程,并对其适用性进行了初步探讨,目前模型的参数需要采用人工调参来获得,后期将基于 Pymoo (Multi-objective Optimization in Python) 优化工具来实现参数的敏感性分析和自动化率定。

4 结 论

(1)渠井结合灌区的农户灌溉用水受水源位置和条件、作物类型、渠道来水情况、水价、灌水量、地下水位、农户灌溉习惯等因素的影响,各因素之间存在复杂的互馈关系,共同影响渠井结合灌区的水循环。

(2)构建包括水文模块、作物模块、农户生计模块和灌溉行为模块 4 个模块的渠井结合灌区农户灌溉用水概念模型,可以合理概化灌溉用水的各个环节并实现农户行为与水文物理过程之间的紧密耦合。

(3)基于 Python 语言开发的 HCLU 模型可以综合考虑灌溉水源、灌溉定额、灌水时间和灌溉方式等环节对灌区水循环的影响,可以模拟作物产量与灌溉量的关系,其在模拟水循环过程的合理性和计算结果的正确性为灌区的水资源可持续管理和农业种植结构的调整提供强有力的技术支撑。

参考文献:

[1] 蒋晓茹,李红军,蔡淑红,等.华北平原井灌区农户灌溉行为调查分析[J].安徽农学通报,2009,15(11):152-154.

[2] 聂相田,邱林,周波,等.井渠结合灌区水资源多目标优化配置模型与应用[J].节水灌溉,2006(4):26-28.

[3] 岳卫峰,杨金忠,朱磊.干旱灌区地表水和地下水联合利用耦合模型研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(增刊 1):554-558.

[4] 王彩鸽.泾惠渠灌区水循环特征及其主要驱动因素研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):173-177.

[5] 刘路广,崔远来.灌区地表水—地下水耦合模型的构建[J].水利学报,2012,43(7):826-833.

[6] 孟春红,路振广,马细霞,等.基于二元水循环的灌区分布式水文模型的应用研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):92-97.

[7] 刘焯,田富强.基于社会水文耦合模型的干旱区节水农业水土政策比较[J].清华大学学报(自然科学版),2016,56(4):365-372.

[8] 姜鹏,刘俊民,黄一帆,等.泾惠渠地下水对气候变化和人类活动的响应[J].人民黄河,2014,36(5):45-47.

[9] 王雪梅,张志强.基于文献计量的社会水文学发展态势分析[J].地球科学进展,2016,31(11):1205-212.

[10] Srinivasan V, Sanderson M, Garcia M, et al. Prediction in a socio-hydrological world[J].Hydrological Sciences Journal,2017,62(3):338-345.

[11] 丁婧祎,赵文武,房学宁.社会水文学研究进展[J].应用生态学报,2015,26(4):1055-1063.

[12] 陆志翔,Wei Y,冯起,等.社会水文学研究进展[J].水科学进展,2016,27(5):772-783.

[13] 田富强,程涛,芦由,等.社会水文学和城市水文学研究进展[J].地理科学进展,2018,37(1):46-56.

[14] Kumar P, Avtar R, Dasgupta R, et al. Socio-hydrology: A key approach for adaptation to water scarcity and achieving human well-being in large riverine islands [J]. Progress in Disaster Science, 2020, 8: e100134.

[15] Nazemi A, Wheeler H S. On inclusion of water resource management in earth system models-Part 1: Problem definition and representation of water demand [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1):33-61.

[16] 马培衢,刘伟章.集体行动逻辑与灌区农户灌溉行为分析:基于中国漳河灌区微观数据的研究[J].财经研究,2006(12):4-15.

[17] 李俊睿,王西琴,王雨濛.农户参与灌溉的行为研究:以河北省石津灌区为例[J].农业技术经济,2018(5):66-76.

[18] 韩洪云,赵连阁.农户灌溉技术选择行为的经济分析[J].中国农村经济,2000(11):70-74.

[19] 林琳,田军仓,朱磊.种植结构变化下渠井结合灌区用水优化配置研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):162-167.

[20] 付强,肖圆圆,崔嵩,等.基于多目标模糊规划的灌区多水源优化配置[J].农业机械学报,2017,48(7):222-227.

[21] O’Keeffe J, Buytaert W, Mijic A, et al. The use of semi-structured interviews for the characterisation of farmer irrigation practices [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(5):1911-1924.

[22] O’Keeffe J, Moulds S, Bergin E, et al. Including farmer irrigation behavior in a sociohydrological modeling framework with application in North India[J].Water Resources Research, 2019, 54(7):4849-4866.

[23] 刘一明,罗必良.水价政策对农户灌溉用水行为的影响:基于农户行为模型的理论分析[J].数学的实践与认识,2011,41(12):27-32.

[24] 邓莉,王小林,洪林,等.节水灌溉对农民投入与产出的影响[J].中国农村水利水电,2000(9):8-10.

[25] 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.