

DOI: 10.5846/stxb202005111182

李想, 韩智博, 张宝庆, 高超, 贺缠生. 黑河中游主要农作物灌溉制度优化. 生态学报, 2021, 41(8): 3067-3077.

Li X, Han Z B, Zhang B Q, Gao C, He C S. Optimization of crop irrigation scheduling in the middle reaches of the Heihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3067-3077.

## 黑河中游主要农作物灌溉制度优化

李 想<sup>1</sup>, 韩智博<sup>1</sup>, 张宝庆<sup>1,\*</sup>, 高 超<sup>1</sup>, 贺缠生<sup>1,2</sup>

1 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室旱区流域科学与水资源研究中心, 兰州 730000

2 美国西密歇根大学地理系, 美国密歇根卡拉马祖 49008

**摘要:**科学的灌溉制度是干旱半干旱地区农业生产的重要保障。黑河位于西北干旱区,是我国第二大内陆河,且当地中游农业灌溉和下游生态需水矛盾十分突出。利用 DSSAT (Decision Support for Agro-technology Transfer) 模型模拟了黑河中游地区玉米、小麦、油菜、马铃薯的生长情况,对比分析了四种作物生育期内需水量变化与当地降水条件、现行灌溉制度之间的差异。通过设置灌溉组合探究了四种作物最适宜的灌溉制度,并计算了优化灌溉制度下的节水潜力。结果表明:DSSAT 模型通过参数校正与验证后,对四种作物生长过程模拟性能较好,产量标准化均方根误差 (nRMSE) 均低于 15.0%,决定系数 ( $R^2$ ) 均达到 0.65 以上。缺水模拟结果表明,四种作物生长季平均水分亏缺介于 122.5—367.0 mm。通过调整灌溉制度,可使玉米、小麦、油菜、马铃薯的水分利用效率分别提高 54.8%、25.0%、18.3% 和 51.3%,且产量变幅均低于 5.0%,实现了高产节水的目的。在研究区实施最优灌溉制度,中游农业灌区每年可以节省  $8.1 \times 10^8 \text{ m}^3$  的水资源量,用于支持下游生态保护。

**关键词:**DSSAT 模型;黑河中游;灌溉制度;节水潜力

## Optimization of crop irrigation scheduling in the middle reaches of the Heihe River Basin

LI Xiang<sup>1</sup>, HAN Zhibo<sup>1</sup>, ZHANG Baoqing<sup>1,\*</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, HE Chansheng<sup>1,2</sup>

1 Center for Dryland Water Resources Research and Watershed Science, Ministry of Education Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA

**Abstract:** Scientific irrigation scheduling is essential for agricultural production in arid and semi-arid regions. Located in the northwest arid region, the Heihe River is the second largest inland (terminal lake) river in China and faces increasing competition for water between the middle reach agricultural irrigation and lower reach ecosystem services. In this study, we use the Decision Support for Agro-technology Transfer (DSSAT) model to simulate the growth of four main crops: maize, wheat, rape seed and potato in the middle reaches of the Heihe River Basin. We first compared the temporal differences between the water demands of the four crops and the precipitation during the growing season as well as the differences between the crop water demands and the current irrigation scheduling. Subsequently, we explored multiple irrigation scheduling combinations during the growth period to optimize irrigation scheduling of the four crops. Finally, we calculated the water saving potential under the optimal irrigation scheduling. Results show after calibration and validation with in situ observations, the DSSAT model has better simulation performance for the four crops in the study region. The standardized root mean square error (nRMSE) of the crop yields is less than 15.0%, and the coefficient of determination ( $R^2$ ) is above 0.65. The annual average water deficit of the four crops ranged from 122.5 to 367.0 mm during the growth season. By

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41530752, 91125010)

收稿日期:2020-05-11; 修订日期:2020-09-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baoqzhang@lzu.edu.cn

adopting the optimal irrigation scheduling, the water use efficiency of maize, wheat, rape seed, and potato could be improved by 54.8%, 25.0%, 18.3% and 51.3%, respectively, and the variation of the simulated crop yield was all lower than 5.0%, achieving both high yield and water conservation. If the optimal irrigation scheduling is applied in the study area, potential water saving could reach to  $8.1 \times 10^8 \text{ m}^3$  annually in the middle reaches, which could be used to support downstream ecological protection.

**Key Words:** DSSAT model; the middle reaches of the Heihe River Basin; irrigation schedule; potentially reduced water amount

水资源是农业生产的重要物质基础,水资源总量严重制约了农业生产水平<sup>[1]</sup>。黑河中游地区是西北地区重要的农业生产基地,也是干旱半干旱区农业的典型代表<sup>[2]</sup>。该区年均降雨量小,年内分布不均匀,自然条件下作物生长过程极易遭受干旱,严重影响作物的生长发育和产量<sup>[3]</sup>,补充灌溉成为了当地农业生产的重要保证。黑河中游灌区农业发达,每年大约有  $2.1 \times 10^9 \text{ m}^3$  的水用于农业灌溉<sup>[4]</sup>,巨大的农业用水量消耗了黑河约 83% 的出山径流<sup>[5]</sup>,导致下游分水处于长期不足的状态。农业灌溉与下游生态需水的矛盾严重挑战着黑河流域水资源的可持续发展<sup>[6-7]</sup>。优化灌溉水资源管理、提高农业水资源利用效率成为了缓解当地用水矛盾的重要手段。

由于科学灌溉的重要性,目前针对干旱半干旱区农业水资源管理进行了大量研究,受控于研究手段,之前的研究主要通过小规模田间试验开展,对某一试验田与作物提出了精确的灌溉管理制度<sup>[8-10]</sup>,但难以充分考虑田间管理、水分管理、与气候条件的组合无法进行多因素综合分析,试验结果单一、局限性较大缺乏且普适性<sup>[11]</sup>。随着信息技术的发展,作物模型的出现为农业研究提供了迅速、有效的技术方法。DSSAT (Decision Support System for Agro-technology Transfer) 是全球应用最为广泛的作物模型之一<sup>[12]</sup>,它综合考虑了作物品种、气候、土壤、田间管理方式等因素,克服了田间试验的诸多缺点,可为区域农业生产综合决策提供依据<sup>[13]</sup>。DSSAT 模型广泛应用于不同地区作物的需水量计算<sup>[14]</sup>、田间管理方式探究<sup>[15-16]</sup>以及气候变化条件下作物光温生产潜力估算<sup>[17]</sup>等。黑河中游地区种植结构复杂、作物类型多样,利用作物模型在该地开展的灌溉管理研究通常只针对某一作物<sup>[18]</sup>,难以代表当地整体农业类型,无法进行全灌区灌溉制度的综合决策。基于此,亟需针对黑河中游四种主要农作物(玉米、小麦、油菜、马铃薯)的田间水分管理制定高效合理的灌溉方案。

本研究选取黑河中游主要种植的四种农作物为研究对象,基于 2005—2017 年张掖气象站数据,利用 2009 年四种作物的物候期、产量、田间蒸散量等大田观测值对 DSSAT 模型进行本地化处理,并用其余年份数据进行验证。而后对作物生育期内缺水量与需水规律进行了模拟探究,通过设置灌溉时期与灌水定额的梯度组合,进一步确定了四种作物最适宜的灌溉方案,为黑河中游农业持续高效生产提供理论技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑河流域 ( $96^{\circ}42' - 100^{\circ}00' \text{N}$ ,  $37^{\circ}41' - 42^{\circ}42' \text{E}$ ) 是我国第二大内陆河流域,地处河西走廊与祁连山中段<sup>[19]</sup>。黑河中游灌区农业发达,农业灌溉主要来源于黑河干流引水及部分地下水开采。行政区划包括张掖市的高台县、临泽县、甘州区、民乐县和山丹县(图 1)。黑河中游多年历史气象条件显示,其年降水量在 55—200 mm 之间,且年内分布极不均匀,多集中在 6—9 月,多年平均蒸发量在 1200—2200 mm 之间,年均气温  $2.8 - 7.2^{\circ}\text{C}$ ,平均日照时长 3085 h<sup>[19]</sup>。研究区作物种植组成见表 1<sup>[20]</sup>。

### 1.2 模型数据库建立

DSSAT 作物模型可以模拟多种作物逐日生长过程,其数据库建立包括气象数据、土壤数据,作物遗传信息以及田间管理方式。输入的气象数据为张掖国家气象站观测数据,站点位于张掖市境内 ( $38^{\circ}55'8''\text{N}$ ,  $100^{\circ}22'58''\text{E}$ ) 通过中国气象局气象数据中心下载 (<http://data.cma.cn/site/index.html>),包含 2005—2017 年逐日

气象数据日最高温 (℃)、日最低温 (℃)、降雨量 (mm) 和日照时长 (h)。日照时长根据国际公认的 Angstrom 经验公式转换成太阳辐射<sup>[21-22]</sup>(式 1);土壤剖面理化性质以及土壤初始水肥条件见参考文献<sup>[18]</sup>。

$$R_s = R_{max} \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right)$$

(1)

式中, $R_s$ 为日太阳总辐射量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $R_{max}$ 为晴天太阳辐射量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $a_s$ 、 $b_s$ 为与大气质量状况有关的经验系数,根据 FAO 推荐一般  $a_s$ 取 0.50, $b_s$ 取 0.25, $n$  为逐日日照时数 (h), $N$ —即最大时长 (h)。

表 1 2017 年黑河中游作物种植组成/%

Table 1 Crop planting composition of the middle reaches of Heihe River Basin in 2017

玉米 Maize	小麦 Wheat	油菜 Rape seed	马铃薯 Potato	合计 Summation
47.7%	13.3%	6.8%	7.7%	75.5%

2017 年《甘肃发展年鉴》县区农作物种植面积统计数据

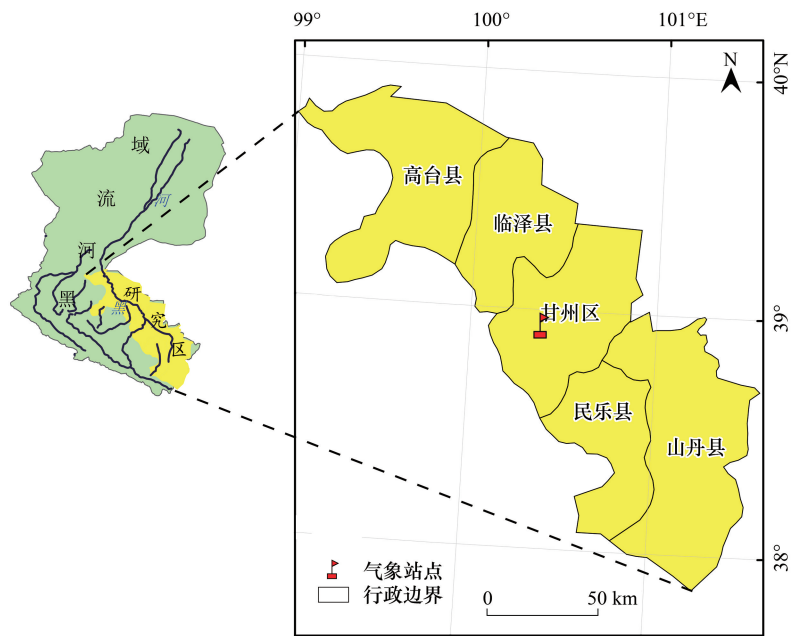


图 1 研究区概况

Fig.1 Map of the study area

田间管理方式包括作物品种、播种日期、播种方式、灌溉施肥等,主要通过野外考察以及实地走访农户获取。所选作物种植类型均为大田作物,春季播种,一年一熟,不存在轮作间作等情况,其中玉米与油菜播种时间约为 4 月中下旬,小麦与马铃薯播种时间约为 3 月中旬。玉米、小麦、马铃薯三种作物灌溉方式为大水漫灌,油菜为移动机械喷灌。灌溉日期、灌水定额、施肥管理以及其他均与大田管理相同。

作物品种参数设定。DSSAT 模型中每种作物模块都有相应的作物品种参数值。作物品种遗传参数是模拟作物生理发育进程,植株发育形态以及产量的重要参数<sup>[23]</sup>。本研究根据当地种植的经纬度,品种类型,气候条件初步确立了每种作物的基础参数值。而后根据 2009 年四种作物田间实测产量以及关键物候期等数据,利用 DSSAT-GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation) 参数估计模块<sup>[24]</sup>不断对参数进行校正与调试直至模拟值与实测值达到较好的一致性。

模型输出结果主要包括干物质积累、叶面积指数、籽粒重量、分层土壤水分、作物蒸散发等参数的逐日动态变化、产量以及生长物候期等。本研究用以验证模型模拟的数据主要包括四种作物 2005—2017 年逐年生育期及关键物候期数据,《甘肃发展年鉴》的各地县主要农产品产量统计数据,2009 年张掖市盈科灌区玉米农

田涡动观测系统数据<sup>[25]</sup>。

### 1.3 DSSAT 模型评价指标

欲对不同作物生长过程、干物质积累、耗水过程以及产量进行准确模拟,选取决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 (nRMSE) 这三个指标来定量评估模型的模拟性能。本研究通过作物生长关键物候期、产量、玉米农田蒸散量来评估模型在当地的适用性。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i) (M_i - \bar{M})}{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{nRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{M}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $S_i$  与  $M_i$  分别为模拟值和实测值,  $\bar{S}$  与  $\bar{M}$  分别为模拟值和实测值的平均值;  $i$  代表模拟值的个数 ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )。通常来讲  $R^2$  值越接近于 1 说明模拟值与实测值的一致性越好, RMSE 的值和 nRMSE 值越小说明模拟值与实测值的误差越小<sup>[26]</sup>。

### 1.4 模拟与探究

#### 1.4.1 作物缺水模拟

水分需求是体现作物生长过程中自身生长发育对水资源的需求量<sup>[27]</sup>。通常认为在充分灌溉条件下田间蒸散量与不灌溉条件下田间蒸散量的差值为作物生育期的缺水量<sup>[28]</sup>。在 DSSAT 模型灌溉管理模块分别设置自动灌溉模式和不灌溉模式来模拟四种作物的田间蒸散量, 计算相应的水分亏缺值。自动灌溉的设定为 0—60 cm 的土层含水量低于有效含水量的 50% 时自动补充灌溉至有效含水量的 90%。

#### 1.4.2 生育期需水规律探究

以 2017 年为现行基准年, 分别计算现行灌溉制度下不同作物逐月的田间蒸散量值并与月降雨量进行对比分析, 来探究四种作物生育期内需水规律以及对当地雨水资源的利用情况。

#### 1.4.3 灌溉情景模拟

本研究针对不同作物类型设定了不同的灌溉制度组合, 组合方式为灌溉时期、灌水次数、灌水定额的排列组合 (表 2)。玉米、小麦整个生育期中选定四个关键期为灌溉时期, 在每个灌溉时期分别设置了 25、50、75、100 mm, 4 个不同的灌水定额, 将灌水定额完全组合, 形成了 25、50、75、100、125、150、175、200、225、250、275、300、325、350、375、400 mm 共计 16 个不同的灌溉定额。灌溉时期与灌水定额完全组合则有  $4^4=256$  个不同的灌溉方案。同时, 将雨养条件作为不灌溉对照试验, 自动灌溉条件作为充分灌溉对照试验, 共计 258 个灌溉方案。

油菜、马铃薯整个生育期选定了三个灌溉时期, 每个灌溉时期设置了 50、100、125 mm, 3 个不同的灌水定额, 形成了 50、100、125、150、175、200、225、250、275、300、325、350、375 mm 共计 13 个灌溉定额。共有  $3^3+2=29$  个灌溉方案。不同作物灌溉时间视作物生长实际情况确定。并根据作物单位面积产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )、灌水量 (mm)、水分利用效率 (Water use efficiency, WUE,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 三个指标来评价灌溉制度节水保产的最优性。

$$\text{WUE} = Y_i/10ET \quad (5)$$

式中,  $Y_i$  为作物干物质的积累量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $ET$  为生育期内的总蒸散量 (mm), WUE 为水分利用效率 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), WUE 值越高表明作物对水资源的利用程度越大。

表 2 灌溉制度设计  
Table 2 Design of irrigation schedules

(a) 玉米、小麦 Maize and wheat				
灌水时期 Irrigation date	苗期 E	拔节期 J	开花期 F/抽雄期 T	灌浆期 Grain filling
灌溉定额 Irrigation quota/mm	25、50、75、100	25、50、75、100	25、50、75、100	25、50、75、100
(b) 油菜、马铃薯 Rape seed and potato				
灌水时期 Irrigation date	苗期 E	开花期 F	成熟期 M/块茎增长期 T	
灌溉定额 Irrigation quota/mm	50、100、125	50、100、125	50、100、125	

苗期 E: Emergence stage, 拔节期 J: Jointing stage, 开花期 F: Flowering stage (玉米), 抽雄期 T: Tassel stage (小麦), 灌浆期 G: Grain filling stage; 成熟期 M: Maturity stage (油菜), 块茎增长期 T: Tuber growth stage (马铃薯)

### 1.5 流域节水量计算

在现行分水方案条件下,计算整个中游流域内四种作物在实行节水灌溉制度时相比现行灌溉制度的节水总量(式 6)。

$$W = \sum_i^n P_i A_i \quad (6)$$

式中:  $W$  为农业总节水量 ( $\text{m}^3$ ),  $P_i$  为作物单位面积节水量 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),  $A_i$  为作物种植面积 ( $\text{hm}^2$ )

## 2 结果与分析

### 2.1 模型校正与验证

选择 2009 年实测数据对四种作物品种参数值进行校准,表 3 为得到的四种作物遗传参数值组合。其中玉米品种参数 P1、P5、PHINT,小麦品种参数 P5、G3、PHINT 为 2009 年生育期观测资料结合当年气象数据计算确定。油菜品种参数 EM-FL、SDFDUR、PODUR 为当年观测资料确定,其余作物生理参数难以直接获取为 GLUE 模块校正所得。

表 3 主要农作物遗传品种参数值  
Table 3 Parameter values of genetic varieties of major crops

玉米 Maize		小麦 Wheat	
遗传参数 Genetic parameter	数值 Value	遗传参数 Genetic parameter	数值 Value
出苗阶段积温 P1 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	240	春化敏感系数 PIV (d)	42.0
光周期敏感参数 P2	0.300	光周期敏感系数 PID ( $\%/h$ )	100.0
吐丝至成熟积温 P5 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	480	灌浆期系数 P5 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	515.0
单株潜在穗粒 G2	500	籽粒数系数 G1 ( $\#/g$ )	1.7
潜在籽粒生长速率 G3 ( $\text{mg 粒}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	5	标准籽粒数重量 G2 (mg)	44.0
出叶间隔指数 PHINT ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	38	成熟期标准茎穗质量 G3 (g)	2.00
		出叶间隔指数 PHINT ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	100
油菜 Rape seed		马铃薯 Potato	
遗传参数 Genetic parameter	数值 Value	遗传参数 Genetic parameter	数值 Value
出苗到开花时间 EM-FL (d)	30	叶面积扩展速率 G2 ( $\text{cm}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	2300
初花到第 1 籽粒时间 FL-SD (d)	19	潜在块茎生长率 G3 ( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	25
第 1 籽粒到成熟时间 SD-PM (d)	36.5	块茎生长胁迫指数 PD	0.6
最大单粒质量 WTPSD (g)	0.003	光周期系数 P2	0.9
灌浆时间 SDFDUR (d)	15	温度敏感系数 TC (d)	17.5
坐果所需时间 PODUR (d)	10		

表 4 为校正年份四种作物主要生育期、产量模拟值与实测值的差异比较。结果表明,DSSAT 模型对四种作物指标的模拟值与实测值的一致性较好,对播种后开花期模拟误差在 3 d 之内,成熟期模拟误差在 5 d 之



内,且 nRMSE 均低于 10%;四种作物产量的校正结果表明,模拟产量与实测产量的误差很小,nRMSE 分别为 1.20%、1.35%、3.20%和 9.44%,校正结果很好。

图 2 为四种作物模拟产量与实测产量的拟合验证。其中玉米、小麦、油菜统计资料较全,验证时长为 2005—2017 年(除去 2009 校正年份);马铃薯在该地区种植历史短,搜集到的产量实测资料略短,验证年份为 2011—2017 年。结果表明,验证期间四种作物产量的决定系数分别为 0.69、0.66、0.80、0.72,均大于 0.65 验证结果较好,表明模拟产量与实测产量达到了较高的一致性。其中玉米、小麦、油菜模拟产量的 nRMSE 值分别为 3.27%、2.31%和 7.37%,均低于 10%,马铃薯模拟产量的 nRMSE 为 12.37%,表明模型对于四种作物的产量模拟误差较低。

表 4 2009 年四种作物的开花期、成熟期及产量模拟值与观测值的统计比较

Table 4 Statistical comparison of the simulated and observed values of flowering and maturity phases and yields of four crops in the study area in 2009

作物类型 Crops	开花期 Flowering period/(DAP)				成熟期 Maturity phases/(DAP)				产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> )			
	模拟值 Simulated	实测值 Measured	nRMSE	误差 Error	模拟值 Simulated	实测值 Measured	nRMSE	误差 Error	模拟值 Simulated	实测值 Measured	nRMSE	误差 Error
玉米 Maize	52	52	0	0	105	103	1.94%	2	8255	8355	1.20%	-100
小麦 Wheat	82	84	2.38%	-2	112	112	0	0	8505	8392	1.35%	113
油菜 Rape seed	42	41	2.44%	1	114	113	0.85%	1	6565	6782	3.20%	-217
马铃薯 Potato	44	41	7.31%	3	131	126	3.97%	5	12775	11673	9.44%	1102

DAP:播种后的天数 Day After Planting

蒸散发(ET: Evapotranspiration)是表征作物生长过程水分消耗的重要参数之一,因此通常用田间蒸散发来表征作物的需水量。利用盈科灌区玉米农田涡动监测系统观测数据计算的蒸散发与 2009 年 DSSAT 模型模拟的玉米田蒸散发进行拟合验证。结果如图 3 所示,两者决定系数为 0.69,均方根误差为 0.25 mm/d,模拟得到的玉米生育期总蒸散值约为 500 mm 左右,这也与其他学者用不同方法计算的该地区玉米蒸散量较为吻合<sup>[27]</sup>。

综上表明,DSSAT 模型对黑河中游地区四种主要农作物物候期、产量和蒸散量均可进行有效模拟,且模拟精度较高具有较强可信性,可为本地区作物需水规律、产量研究等提供可靠理论依据。

## 2.2 缺水量与需水规律模拟

表 5 为 2011—2017 年四种作物缺水量的计算结果。可以看出四种作物在不同年份生育期的缺水量存在较大差异。2011—2017 年玉米田在充分灌溉条件下总蒸散量介于 470.0—506.3 mm,缺水量介于 274.4—404.7 mm,平均缺水为 367.0 mm;小麦田整个生育期内缺水量介于 200.0—326.3 mm,平均缺水为 254.0 mm;油菜田生育期平均缺水为 213.3 mm,马铃薯生育期平均缺水为 122.5 mm。结果表明自然条件下该地区农作物水量缺口极大,灌溉必是保障该地区农业生产的重要条件。

表 5 2011—2017 年作物蒸腾量与缺水量模拟/mm

Table 5 Crop evapotranspiration and water shortage from 2011 to 2017

年份 Years	玉米 Maize			小麦 Wheat			油菜 Rape seed			马铃薯 Potato		
	充分灌溉 ET	无灌溉 ET	缺水量 Water shortage	充分灌溉 ET	无灌溉 ET	缺水量 Water shortage	充分灌溉 ET	无灌溉 ET	缺水量 Water shortage	充分灌溉 ET	无灌溉 ET	缺水量 Water shortage
2011	470.0	65.3	404.7	435.5	162.6	272.9	437.7	165.1	272.6	379.5	299.8	79.7
2012	476.5	127.5	349.0	425.5	191.2	234.3	437.8	214.4	223.4	378.9	267.5	111.4
2013	480.6	140.3	340.3	398.5	138.4	260.1	328.3	228.0	100.3	400.7	312.0	88.7
2014	485.2	111.4	373.8	433.9	155.4	278.5	414.4	194.8	219.6	402.2	237.4	164.8
2015	506.3	105.2	401.1	425.7	99.4	326.3	393.9	207.0	186.9	401.4	220.0	181.4
2016	498.0	72.6	425.4	432.7	232.7	200.0	453.6	163.4	290.2	366.8	256.3	110.5
2017	496.4	222.0	274.4	447.2	241.2	206.0	477.6	277.5	200.1	366.5	245.9	120.6

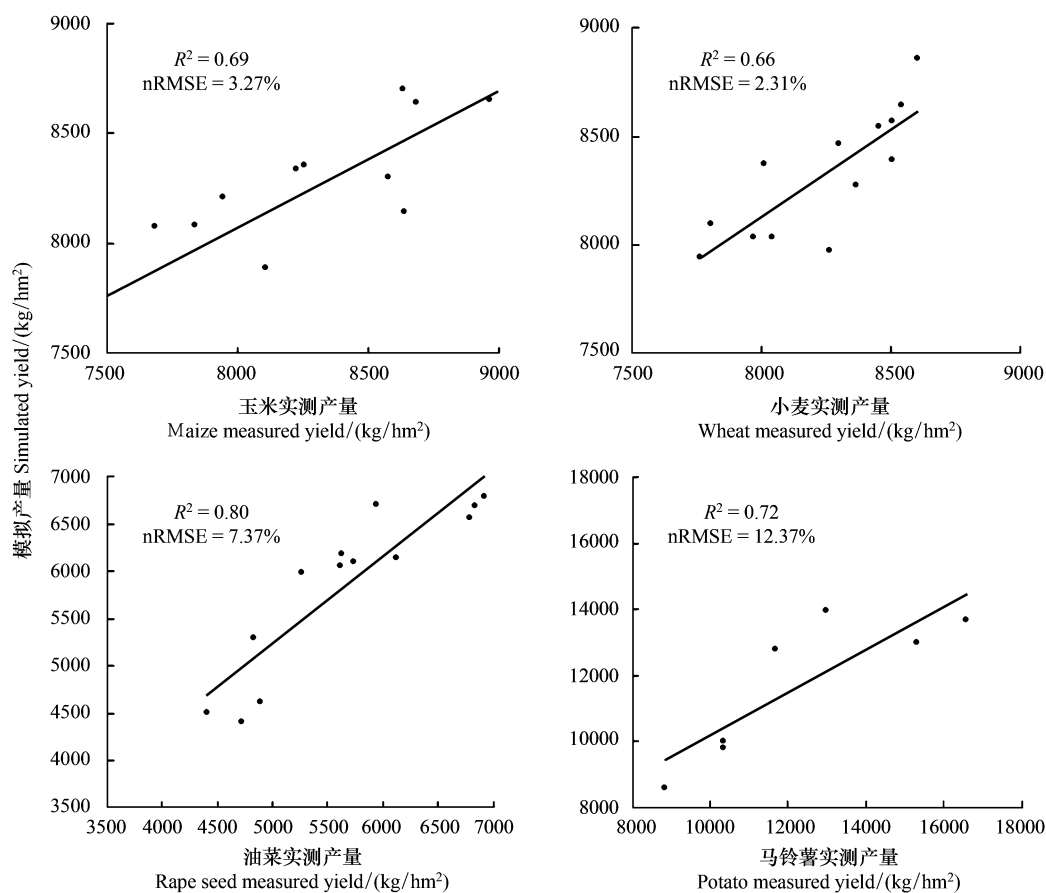


图 2 不同作物模拟产量与实测产量验证拟合

Fig.2 The fitting curve of the simulated yield and measured yield of different crops

图 4 为 2017 年四种作物逐月耗水量与降雨的分布情况。图中显示,不同作物之间 ET 的分布与降雨的分布差异较大,但高峰均分布在 6—7 月份,这与当地的降水分布也较为一致。但四种作物在 6—7 月需水高峰时段仍存在较大的水分亏缺,需要进行补充灌溉。其中玉米、油菜四月中下旬播种,两者需水规律分布较一致,小麦与马铃薯三月中下旬播种需水规律较一致。但可以看出小麦、马铃薯需水最高峰较玉米、油菜的出现的稍早。

### 2.3 灌溉情景模拟

将制定好的各个灌溉制度方案应用到 DSSAT 模型中模拟四种作物的生长情况,其中玉米、小麦、油菜的模拟时间为 2005—2017 年,马铃薯由于实测资料较短模拟时间为 2011—2017 年。并综合考虑作物产量,灌溉总用水量和水分利用效率三个因素对灌溉制度进行优选。图 6 为现行灌溉制度与模拟优选的灌溉制度组合图。可以看出两者无论是数值还是空间分布均存在较大的差异。现行灌溉制度下玉米、小麦、油菜、马铃薯的灌溉定额分别为 900、750、500、500 mm 均大于表 5 中模拟计算的作物总需水量的值,说明该地区普遍存在过

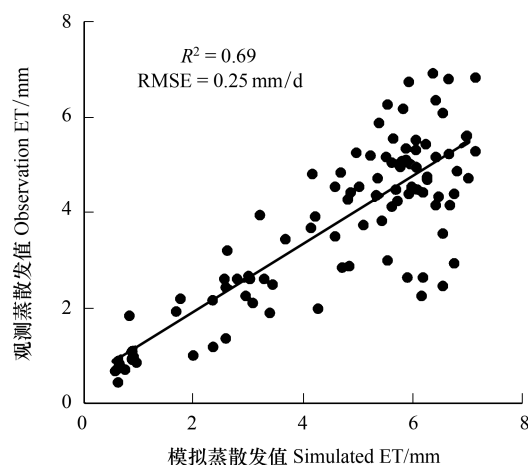


图 3 2009 年玉米农田逐日蒸散发与涡动相关通量塔观测蒸散发比较

Fig.3 Comparison of the simulated daily evapotranspiration and observed evapotranspiration by eddy correlation flux tower in corn fields in 2009

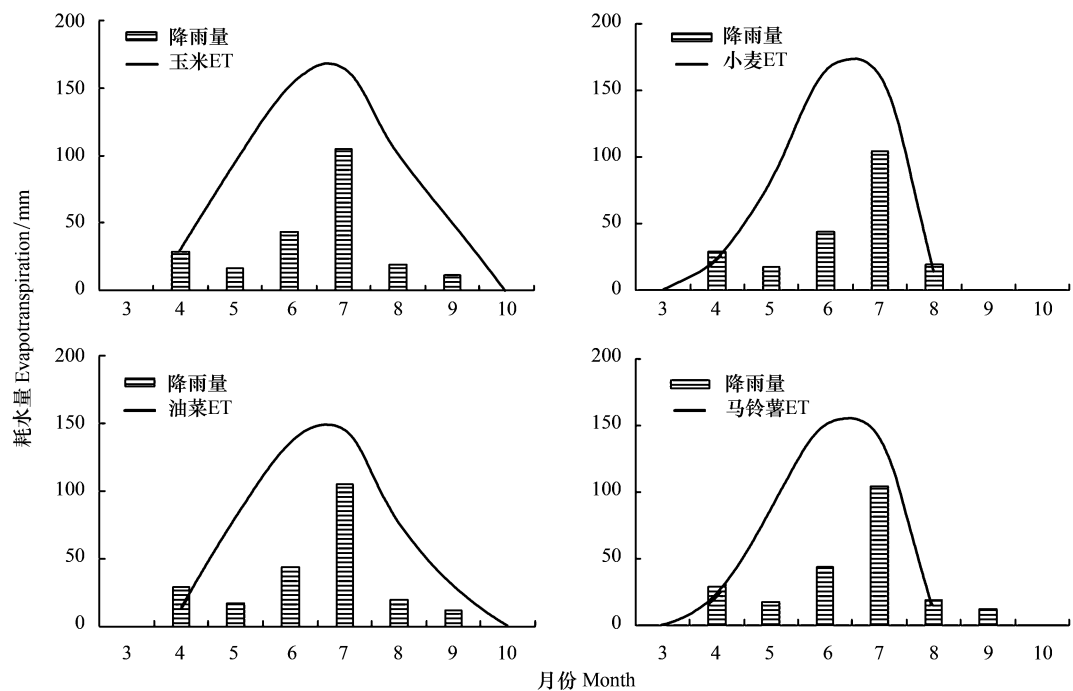


图 4 2017 年四种农作物生育期耗水量与降雨的分布

Fig.4 Distribution of water consumption and effective rainfall during the growth period of four crops in the study area in 2017

量灌溉,造成了水资源不必要的浪费。在不同的灌溉方案中,灌溉总量对作物产量与水分利用效率的影响十分显著<sup>[28]</sup>。WUE 是体现作物对水资源利用能力,WUE 的值越高表明作物对有限水资源的利用程度就越好。灌溉方案模拟显示,玉米农田在苗期、拔节期、开花期、灌浆期均需要进行灌溉,在灌水定额分别为 75、100、100、100 mm 组合时模拟产量值最高,与充分灌溉条件下产量十分接近。此时 WUE 值为 2.17 kg/m<sup>3</sup>达到了最高,且产量与 WUE 的值不再随灌水量的增大而显著变化,见图 5。依据同样的原则确立了其他三种作物的优选灌溉水平方案,见图 6。

表 6 为现行灌溉制度与节水灌溉制度下的模拟结果比较。结果表明,在优选的灌溉制度下,两者的模拟产量十分接近,产量波动均低于 5.0%,表明调整后的灌溉制度对作物产量影响较小。在优选的灌溉制度下四种作物的水分利用效率均有很程度的提高,实现了作物节水高产的目标。

2.4 流域推广

如表 6 所示,在实行节水灌溉制度下,玉米、小麦、油菜、马铃薯较现行灌溉制度分别节水 5250、3750、1500、1500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。以 2017 年黑河中游作物现行种植面积配比为为例,在整个中游流域实行该灌溉制度可使全流域节省约 8.1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>的水资源量。若将该地区农业节约水量按分水方案集中下泄至正义峡断面,将会对下游水域面积、绿洲面积、地下水位抬升等带来极大的积极影响。

表 6 不同作物现行灌溉与节水灌溉模拟结果比较

Table 6 Comparison of simulation results of current irrigation and water-saving irrigation for different crops								
作物类型 Crops	作物产量		水分利用效率			灌溉节水量 Water saved/ (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	种植面积 Cultivated area/ (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	总节水量 Water saved/ m <sup>3</sup>
	Crop Yield/(kg/hm <sup>2</sup> )		WUE/(kg/m <sup>3</sup> )					
	现行灌 溉条件	节水灌 溉条件	现行灌 溉条件	节水灌 溉条件	增长 百分比			
玉米 Maize	8338	8206	1.41	2.19	54.8%	5250	120.0	8.1×10 <sup>8</sup>
小麦 Wheat	8324	7805	1.66	2.09	25.0%	3750	33.5	
油菜 Rape seed	5668	5581	1.35	1.59	18.3%	1500	17.1	
马铃薯 Potato	12893	11378	2.15	3.25	51.3%	1500	19.4	



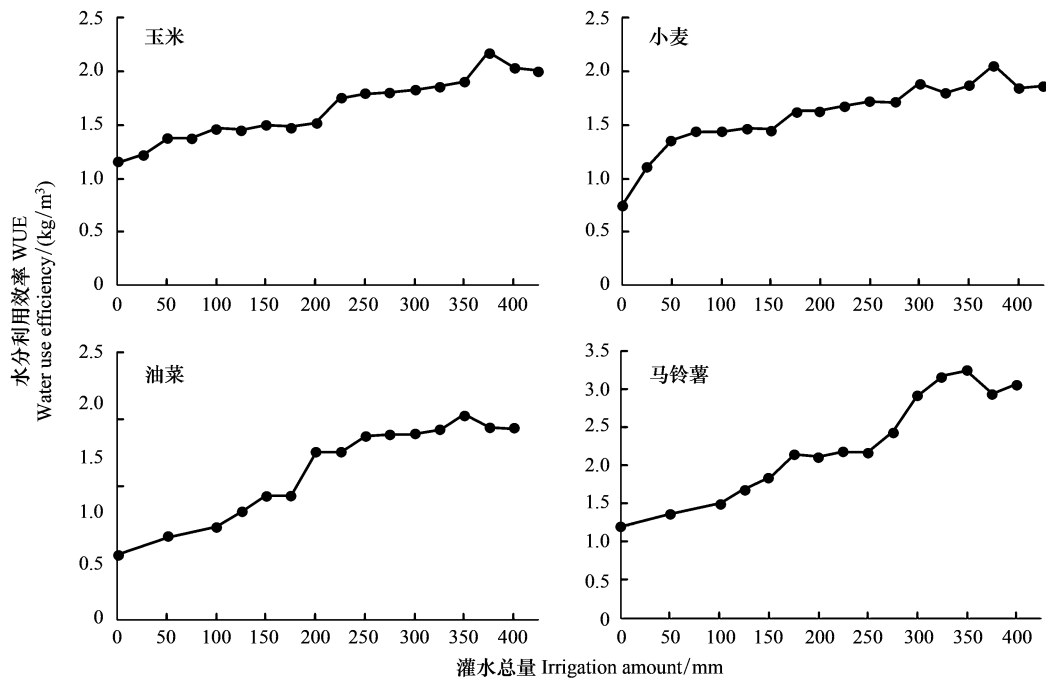


图5 不同灌水总量下水分利用效率计算值

Fig.5 The calculated value of WUE under different irrigation amount

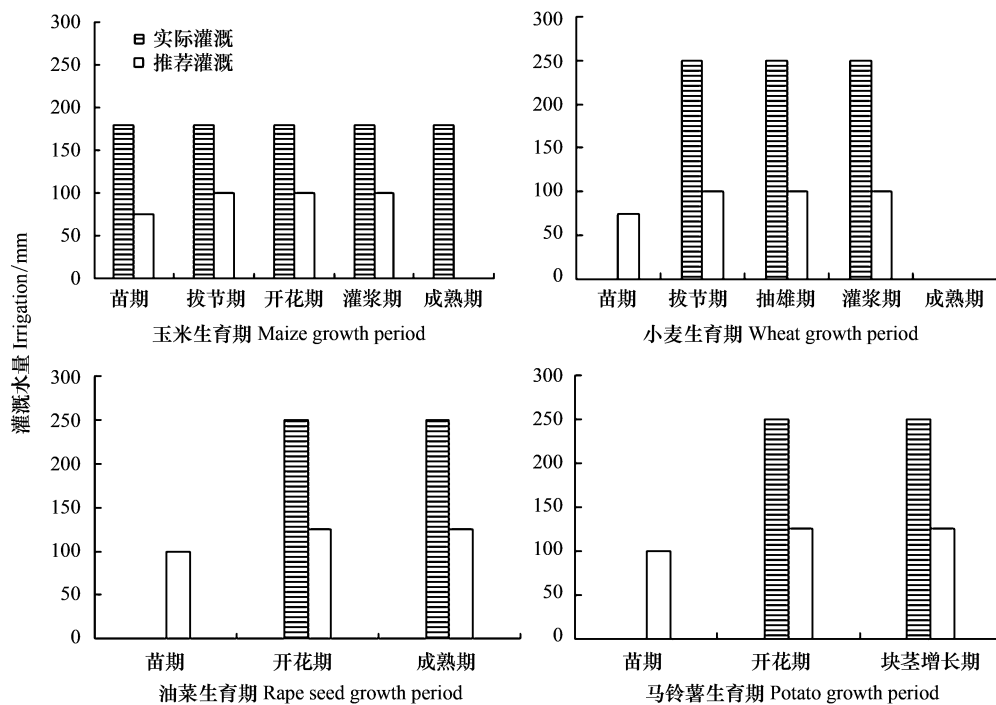


图6 四种作物现行灌溉制度、推荐灌溉制度

Fig.6 Current irrigation schedule and recommended irrigation schedule of four crops

### 3 讨论

DSSAT 作物品种参数决定了作物的生长发育过程与产量积累,参数的准确性直接影响着模拟结果的准

确性。通过参数本地化处理,四种作物的主要生育期与产量的评价指标均表示出模型的模拟性能非常好,在田间蒸散量验证中 DSSAT 模拟的逐日蒸散发值与观测值具有较好的一致性,且均方根误差较低表明 DSSAT 可以较准确的模拟作物需水过程。校正与验证的结果表明了 DSSAT 模型在黑河中游地区具有较好的适用性,可为该地区农业研究提供可靠的理论依据。

通过对四种作物缺水量的计算,发现黑河中游地区四种农作物在生育期内存在不同程度的水分亏缺。且作物的缺水量与土壤的贮水情况密切相关<sup>[29]</sup>。黑河中游地区降水量少,蒸发强烈,地表浅层含水量较低,作物不能很好的利用土壤中的水分,从而导致其存在较大的水分缺口。在需水规律模拟中,玉米与油菜播种时期均为 4 月下旬,两者的需水规律分布相似,需水高峰出现在 7 月,且 7 月降雨量为全年最高更有利于作物的生长发育。小麦与马铃薯需水规律分布相似,两者播种期为 3 月中下旬,小麦种子萌发前需要进行一段时间的“春化”,马铃薯块茎萌发前有短暂的“休眠期”,因此两者在 3 月几乎没有株间蒸腾,田间蒸散值较低,而在出苗后耗水量陡增<sup>[30]</sup>。且两者的播种期较玉米、油菜早,需水高峰出现的也较前两者稍早。

此外在灌溉处理水平中,不同生育期与不同的灌水定额对作物产量与水分利用效率影响极大。玉米、小麦为黑河中游的主要粮食作物,需要保障产量适宜充分灌溉,主要侧重水分在生育期内的分配,在苗期阶段(4 月底—5 月初)田间蒸散量较小适宜少量补充灌溉,拔节期、开花期、抽雄期、块茎增长期、灌浆期(几个阶段均位于 6—7 月)是四种作物需水量的高峰期、生长发育的关键时期,也是影响产量的重要时期适宜充分灌溉<sup>[14,16,29-30]</sup>。灌溉制度优化的目的是实现产量与水分利用效率的有效统一。研究表明,作物产量、WUE 与灌水总量之间呈现非线性关系(图 5),在非充分灌溉条件下,产量与 WUE 的值随着灌水量的增多而不断增大。当灌水量增大到一定程度时,产量将不再增加甚至降低,WUE 的变化也呈现先增加后降低的趋势。在表 6 中,优化后的灌溉制度下玉米、小麦、油菜和马铃薯的 WUE 值分别较现行灌溉制度提高了 54.8%、25.0%、18.3%和 51.3%,实现了节水高产的目的,对黑河中游农业灌溉管理提供了较强的参考意义。

本研究针对现行水平年黑河中游灌区四种主要农作物提出了相应的优化灌溉制度,但并不一定能完全适应当地的气候条件,尤其是在不同水文年型下不同作物最优灌溉制度还有待探究。作物模型的应用是为农业生产提供预测与科学的指导,节水灌溉制度的确立是水资源高效利用,压缩农业用水的重要方法。除优化灌溉制度外,可从种植结构调整,发展节水经济型产业等方面达到压缩用水提高经济效益的目的。此外加强渠系防渗、兴修水利工程、发展滴灌喷灌等高效灌溉方式也是减少无效渗漏,提高输水用水效率的有效方式<sup>[31]</sup>。

#### 4 结论

本研究基于 DSSAT 模型模拟了 2005—2017 年黑河中游地区四种主要农作物玉米、小麦、油菜、马铃薯的生长情况,确定了相对应的最佳灌溉制度。经过模型本地化处理、校正与验证,结果表明 DSSAT 模型在本研究区的模拟性能很好,可以准确的模拟四种作物的生长发育、需水过程和产量。通过对生育期需水量模拟结果得出,自然条件下四种作物整个生育期内存在不同程度的水分亏缺,玉米、小麦、油菜、马铃薯平均缺水量分别为 367.0 mm、254.0 mm、213.3 mm、122.5 mm。灌溉情景模拟结果表明,现行灌溉制度在作物各个生育期均存在过量灌溉,应该根据作物实际水分需求制定相应的灌溉制度。玉米、小麦生育期推荐灌溉定额为 375 mm,其中苗期灌水 75 mm,其他生育期各 100 mm。油菜、马铃薯生育期推荐灌溉定额为 350 mm,苗期灌水 100 mm,其他生育期各 125 mm。将优化后的灌溉制度应用于黑河中游农业生产在实现节水高收益的同时可为下游节约  $8.1 \times 10^8 \text{ m}^3$  的水资源量。

#### 参考文献(References):

- [1] 山仑,康绍忠,吴普特. 中国节水农业. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [2] 宋先松. 黑河流域水资源约束下的产业结构调整研究——以张掖市为例. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 81-84.
- [3] Zhao W Z, Liu B, Zhang Z H. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 215-223.

- [4] 孙雅琦. 黑河下游生态需水及生态调度研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [5] 李希, 张爱静, 姚莹莹, 郑春苗. 黑河流域中游灌区灌溉引水量与引水结构的变化分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 95-100.
- [6] Li X, Cheng G D, Ge Y C, Li H Y, Han F, Hu X L, Tian W, Tian Y, Pan X D, Nian Y Y, Zhang Y L, Ran Y H, Zheng Y, Gao B, Yang D W, Zheng C M, Wang X S, Liu S M, Cai X M. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in endorheic basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(2): 890-914.
- [7] Jiang Y, Xu X, Huang Q Z, Huo Z L, Huang G H. Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 67-81.
- [8] 杨建国, 田军仓, 康金虎, 王天宁. 银北灌区春小麦节水灌溉制度试验研究. 灌溉排水学报, 2005, 24(5): 29-31.
- [9] 郑成岩, 于振文, 张永丽, 王东, 许振柱. 不同施氮水平下灌水量对小麦水分利用特征和产量的影响. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2799-2805.
- [10] 姚小英, 蒲金涌, 姚茹莘, 乔艳君. 甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估. 生态学报, 2010, 30(22): 6242-6248.
- [11] 程志强, 蒙继华. 作物单产估算模型研究进展与展望. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 402-415.
- [12] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [13] He J Q, Dukes M D, Hochmuth G J, Jones J W, Graham W D. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES-Maize model. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 61-70.
- [14] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 795-802.
- [15] 邵光成, 王志宇, 王小军, 汤树海, 姚怀柱. 基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究. 农业机械学报, 2019, 50(10): 289-297.
- [16] 刘影, 关小康, 杨明达, 丁超明, 崔静宇, 黄洁, 梅福建, 王怀苹, 王同朝. 基于 DSSAT 模型对豫北地区夏玉米灌溉制度的优化模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5348-5358.
- [17] 韩智博, 张宝庆, 田杰, 贺缠生. 基于 CCSM4 气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 108-115.
- [18] Jiang Y W, Zhang L H, Zhang B Q, He C S, Jin X, Bai X. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 37-45.
- [19] 姜瑶. 黑河中游绿洲多尺度农业水文过程及用水效率的模拟分析与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [20] 《甘肃发展年鉴》编委会. 2018 甘肃发展年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [21] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 刘健, 李毅, 吴淑芳, 冯浩, 何建强. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138-150.
- [22] 宋利兵, 陈上, 姚宁, 冯浩, 张体彬, 何建强. 基于 GLUE 和 PEST 的 CERES-Maize 模型调参与验证研究. 农业机械学报, 2015, 46(11): 95-111.
- [23] 陈上, 窦子荷, 蒋腾聪, 李华龙, 马海蛟, 冯浩, 于强, 何建强. 基于聚类法筛选历史相似气象数据的玉米产量 DSSAT-CERES-Maize 预测. 农业工程学报, 2017, 33(19): 147-155.
- [24] 杨晓慧, 黄修桥, 陈震, 韩启彪. 基于 DSSAT 模拟的灌溉用水效率评价指标比较. 农业工程学报, 2015, 31(24): 95-100.
- [25] Liu S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y, Ren Z G. The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-21.
- [26] Liu S, Yang J Y, Drury C F, Liu H L, Reynolds W D. Simulating maize (*Zea mays* L.) growth and yield, soil nitrogen concentration, and soil water content for a long-term cropping experiment in Ontario, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(3): 435-452.
- [27] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 乔冬梅, 李中阳, 梁志杰. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响. 农业工程学报, 2015, 31(5): 85-92.
- [28] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
- [29] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1965-1970.
- [30] 李林. 马铃薯各生育时期需水关键技术. 种子科技, 2019, 37(11): 22-23.
- [31] 蒙古军, 汪疆玮, 王雅, 周朕, 江颂. 基于绿洲灌区尺度的生态需水及水资源配置效率研究——黑河中游案例. 北京大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 171-180.