

基于 AquaCrop 模型的塔额盆地 夏玉米节水潜力分析

任聪哲^{1,2}, 范文波^{1,2}, 乔长录^{1,2}, 王世威^{1,2}, 李顺顺^{1,2}, 刘雨^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子 832000)

摘要:以 AquaCrop 模型为基础,结合 2021—2022 年塔额盆地夏玉米实测数据,对模型部分保守参数和产量模块的标准水分生产力 (WP^*) 和参考收获指数 (HI_0) 进行校准与验证,通过设置起始灌水时间、灌溉定额和灌水周期三因素交叉试验,对夏玉米进行产量模拟,分析其产量与作物水分利用效率受灌溉定额和起始灌水时间的影响程度,在产量和作物水分利用效率均为较高值的前提下选择最优灌溉方案。以实际夏玉米播种面积为参考值,模拟并预测 2022 年及未来 4 年在不同灌溉方案下的夏玉米产量和节水总量,并依此分析塔额盆地夏玉米节水潜力。结果表明:(1)对 AquaCrop 模型作物生长模块主要参数、土壤水分胁迫参数和产量模块参数 WP^* 和 HI_0 进行参数率定,最终产量模块参数选择 $WP^* = 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$,2021 年和 2022 年产量模拟相对误差值分别为 1.26% 和 1.07%。(2)结合模型模拟得出最优灌溉方案如下:起始灌水时间 5 月 20 日,灌溉定额 470 mm,灌水周期 7 d,灌水 11 次,作物水分利用效率 $2.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,产量 $9.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。(3)以 2022 年为现状水平年,最优灌溉方案下,现状水平年和未来水平年(2022—2025 年)可分别实现节水量 2.1338×10^5 、 2.1826×10^5 、 $2.1992 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $2.2306 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

关键词:夏玉米;节水潜力;AquaCrop 模型;塔额盆地

中图分类号:S513;S152.7⁺5 文献标志码:A

Analysis of water-saving potential of summer maize in Ta'e Basin based on AquaCrop model

REN Congzhe^{1,2}, FAN Wenbo^{1,2}, QIAO Changlu^{1,2}, WANG Shiwei^{1,2}, LI Shunshun^{1,2}, LIU Yu^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Based on the AquaCrop model, combined with the measured data of summer maize in the Ta'e Basin in 2021–2022, the conservative parameters of the model and the standard water productivity (WP^*) and the reference harvest index (HI_0) of the yield module were calibrated and verified. Through the setup of a three-factor crossover test of initial irrigation time, irrigation quota, and irrigation cycle, the yield of summer maize was simulated, and the degree to which its yield and crop water use efficiency were affected by irrigation quota and initial irrigation time was analyzed. The optimal irrigation scheme was selected under the premise that both yield and crop water use efficiency were higher values. Taking the actual summer maize sown area as a reference value, the summer maize yield and total water-saving under different irrigation schemes in 2022 and the next four years were simulated and predicted, and the water-saving potential of summer maize in Ta'e Basin was analyzed accordingly. The results showed that: (1) The parameter rates of the main parameters of the crop growth module, the soil water stress parameters and the yield module parameters WP^* and HI_0 of the AquaCrop model were determined, and the final parameters of the yield module were selected as $WP^* = 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and $HI_0 = 43\%$, and the relative error values of the yield simulations were 1.26% in 2021 and 1.07% in 2022, respectively. (2) Combined with the model simulation,

收稿日期:2023-08-01

修回日期:2023-11-03

基金项目:新疆生产建设兵团第九师 2022 年度灌溉水有效利用系数测算分析项目(0415-KH0134);新疆生产建设兵团第九师科技计划项目(2022JS012);国家自然科学基金(51569028,51769030,41761064)

作者简介:任聪哲(1999–),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail:1532854211@qq.com

通信作者:范文波(1975–),男,宁夏吴忠人,教授,主要从事节水灌溉理论及农业水土资源高效利用研究。E-mail:fwb205@163.com

the recommended optimal irrigation scheme is as follows: the starting irrigation time is May 20; the irrigation quota is 470 mm; the irrigation period is 7 days; the irrigation period is 11 times; the crop water-use efficiency is 2.005 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, and the yield is 9.423 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$. (3) Taking 2022 as the current level year, the water saving can be realized in the current level year and future level years (2022–2025) under the optimal irrigation scheme, and the water saving amounts are 2.1338×10^5 , 2.1826×10^5 , $2.1992 \times 10^5 \text{ m}^3$ and $2.2306 \times 10^5 \text{ m}^3$, respectively.

Keywords: summer maize; water-saving potential; AquaCrop model; Ta'e basin

近年来,随着全球人口的不断增长和经济的发展,水资源短缺问题日益严重。新疆塔额盆地作为我国西北部重要的农业生产基地,2022 年旱地玉米占玉米总种植面积的 19.28%,较 2021 年增长 2.65%,其农业节水工作至关重要。该地区降水量小、蒸发量大,提高灌溉水利用效率成为保证区域农业生产的根本。然而,现阶段该地区玉米灌溉定额过高,导致灌溉水浪费严重,使灌区灌溉水利用效率低,因此节水问题已经迫在眉睫。如何节水、怎样节水,一直是国内外的研究热点,刘振等^[1]、孙亚楠等^[2]和张欣等^[3]分别通过研究耕作制度、节水改造工程、用水定额等方法来讨论区域节水的可行性。本文旨在通过有效提高节水总量来探讨提高水分利用效率的问题。

AquaCrop 模型是一种被广泛应用的通用型作物生长模拟模型,具有参数较少、简便、精确和稳定等优点^[4],在亏缺灌溉等水资源短缺的情况下,该模型的应用更加广泛^[5],对于提高农业生产效率具有重要意义^[6]。国内外学者通过运用该模型开展大量研究,对小麦^[7]、玉米^[8]、马铃薯^[9]、棉花^[10]和茶叶^[11]等作物进行了模拟,评价了生物量、产量和冠层覆盖度等模型参数的模拟精度和模型适用性^[12]。薛亚荣等^[13]通过探究气象因子与棉花各生育时期需水量以及灌溉需水量之间的关系,分析得出塔城地区棉花灌溉需水量的减少很大程度上取决于降水量的增加。柴顺喜等^[14]通过对新疆地区滴灌小麦进行产量模拟,为制定小麦合理的灌溉方案提供了理论依据。常梅等^[15]通过分析不同灌溉方式对夏玉米根际土壤含水率和产量的影响,以产量最大为前提,提出最优灌溉方案。AquaCrop 模型在新疆地区应用的研究较少,对新疆地区夏玉米的不同起始灌水时间、不同灌溉定额和不同灌水周期的模拟分析较缺乏,对该地区实际灌溉方案的研究也明显不足。

塔额盆地水资源短缺,年均缺水量达 500 万 m^3 ,而 2022 年灌溉水有效利用系数仅为 0.60,低于欧美灌溉水有效利用系数。2022 年塔额盆地实际农田灌溉面积为 4.5 万 hm^2 ,毛灌溉水量为 25 157

万 m^3 ,其中玉米种植面积占比 50.1%,毛灌溉水量占比 57.2%,其 2022 年灌溉定额为 517.5 mm,远高于合理灌溉定额,地区作物节水潜力巨大^[16]。

探究研究区夏玉米的节水潜力,结合模型模拟不同灌溉方案下作物的产量与水分利用效率,提出最优灌溉方案,可为塔额盆地节水工作和农业水资源高效利用提供理论依据。

1 研究区概况与试验设计

1.1 研究区概况

塔额盆地位于新疆维吾尔自治区西北部 ($82^{\circ}15' \sim 85^{\circ}10' \text{E}$, $45^{\circ}25' \sim 47^{\circ}03' \text{N}$),总面积约 4.2 万 km^2 。塔额盆地属中温带干旱和半干旱气候区,是典型的干旱缺水地区。2022 年农业用水量为 28 849 万 m^3 ,占总用水量 95% 以上,灌溉用水主要依靠自流水和机井抽水,灌溉方式主要为滴灌,有效灌溉面积为 6.17 万 hm^2 。地区年均降水量为 368.3 mm,蒸发量 1 544.7 mm,年均日照时数 2 591.5 h,无霜期 123 d。研究区内主要种植作物为玉米、小麦和甜菜,占总种植面积的 87.23%,其中玉米占比 50.1%。

1.2 试验方案

选取塔额盆地夏玉米地进行试验,熟制为一年一熟,地下水深埋超过 5 m,2022 年夏玉米实际灌溉定额约为 517.5 mm,灌溉次数为 12 次。为探究不同灌溉方式下夏玉米产量和水分利用效率,并优化夏玉米的灌溉制度,从而实现其栽培的高产高效,制定三因素交叉试验方案,夏玉米播种时间统一设置为 4 月 20 日。试验设 2 个起始灌水时间,即 5 月 20 日和 5 月 30 日;每个灌水时间下设 5 个灌水梯度:A/a (380 mm),B/b (410 mm),C/c (440 mm),D/d (470 mm),E/e (500 mm);每个灌水梯度下设 2 个灌水周期 (7 d 和 10 d),分别对应灌水次数 11 次和 8 次。共计 20 个处理,如表 1 所示。其中 A1、B1、C1、D1、E1 为 2021 年和 2022 年实地对照试验,4 月 20 日播种,9 月 28 日收获,用以校准和验证 AquaCrop 模型的参数和本地适用性。

表 1 模拟不同灌溉方案设置

Table 1 Simulation of different irrigation scheme settings

起始灌溉时间 Initial irrigation time (m-d)	处理 Treatment	灌溉定额/mm Irrigation quota	灌水周期/d Irrigation cycle	灌水次数 Irrigation frequency
05-20	A1*	380	7	11
	A2	380	10	8
	B1*	410	7	11
	B2	410	10	8
	C1*	440	7	11
	C2	440	10	8
	D1*	470	7	11
	D2	470	10	8
	E1*	500	7	11
	E2	500	10	8
05-30	a1	380	7	11
	a2	380	10	8
	b1	410	7	11
	b2	410	10	8
	c1	440	7	11
	c2	440	10	8
	d1	470	7	11
	d2	470	10	8
	e1	500	7	11
	e2	500	10	8

注: * 为实地对照试验,下同。

Note: * represents field controlled trial. The same below.

2 数据来源与处理

2.1 研究方法

2.1.1 AquaCrop 模型基本原理方程 AquaCrop 模型反映了作物生物量和产量对水分供应的响应规律,能够帮助评估作物生产和管理策略对粮食安全和环境的影响^[17],其作物产量对于水分响应的关系方程如下^[18-19]:

$$\frac{Y_x - Y_0}{Y_x} = K_y \times \frac{ET_0 - ET_a}{ET_0} \quad (1)$$

式中, Y_x 和 Y_0 分别为作物最大和实际产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_0 和 ET_a 分别为作物潜在和实际蒸腾量 (mm); K_y 为作物产量和土壤蒸发量间的相关系数。

为更加准确衡量和预测作物生长和产量,经过改进,基于式(1)构建产量与作物蒸发蒸腾量和地上部生物量之间的关系方程如下^[20]:

$$B = WP^* \times \sum T_r \quad (2)$$

$$Y = B \times HI \quad (3)$$

式中, B 为地上部生物量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); WP^* 为标准化水分生产效率参数 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); T_r 为作物蒸发蒸腾量 (mm); HI 为作物收获指数 (%); Y 为最终作物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.1.2 水分利用效率 农业用水的消耗主要为田间耗水,主要包括土壤蒸发与作物蒸腾,本文采用的产量水分利用效率公式,通过单位水分消耗获得的产量与蒸散发量的比值来表示,如式(4)所示^[21]:

$$WUE = \frac{Y}{\sum ET_x} \quad (4)$$

式中, Y 为作物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); $\sum ET_x$ 的计算结果为作物的实际用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.1.3 作物节水量的计算 本文主要通过优化灌溉措施达到节水的目的,以 2022 年塔额盆地夏玉米总播种面积 $1\,633 \text{ hm}^2$ 、实际灌溉定额 517.5 mm 为基础,以种植面积不变为模拟参考,2022—2025 年塔额盆地灌溉水有效利用系数分别为 0.5999 、 0.605 、 0.610 、 0.615 ,模拟出不同灌溉方式下的节水总量。作物节水量计算方程如下^[22]:

$$\Delta W_c = 10^{-4} \times A_0 \times \left(\frac{I_{a1}}{\eta_1} - \frac{I_{a2}}{\eta_2} \right) \quad (5)$$

式中, A_0 为实际灌溉面积 (10^4 hm^2); I_{a1} 和 I_{a2} 分别为作物现阶段实际灌溉定额和设定的 5 种低于现阶段的灌溉定额 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); η_1 和 η_2 分别为作物实际的和可能的灌溉水有效利用系数; ΔW_c 为可能的总节水量 (10^8 m^3)。

2.1.4 夏玉米产量的测算 试验地夏玉米种植采用宽窄行交替种植(宽行 60 cm ,窄行 40 cm),种植密度为 $12 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在夏玉米成熟后选取能够代表作物整体长势的 12 株玉米,风干后人工脱粒,于 75°C 烘至恒重,而后测算产量并折算公顷产量。

2.2 AquaCrop 模型主要参数率定与模型数据库构建

本文对 AquaCrop 模型的本地化参数校准与验证,选择使用 2021—2022 年塔额盆地的实测数据,该模型需要的基础数据模块包括气象数据模块、土壤参数模块、作物参数模块和田间管理模块等。试验地地下水深度超过 5 m ,因此不考虑地下水渗漏对模型参数的影响。

2.2.1 气象数据模块 本文气象数据采用国家气象科学数据中心、中国地面基本气象观测数据(数据 ID: 1.2.156.416.CMA.D3.A001.001.OB.WB.CHN.MUL.HOR.ZD.1)以及塔额盆地自设气象站数据。2021 年和 2022 年夏玉米全生育期内逐日最高、最低气温、平均气温和降水量如图 1 所示。

2.2.2 土壤参数模块 本文需要向模型输入的土壤参数包括土层深度与分层、土壤质地、容重与各分层土层的砂粉粘占比、田间持水量、凋萎含水量、

饱和含水量和饱和导水率等。通过环刀法测取不同深度下的土壤田间持水量、凋萎含水量、饱和含水量等参数,详见表 2。

2.2.3 作物参数模块 采用 AquaCrop 模型自带的玉米参数取值范围与试错法进行实际玉米参数的校准。通过结合 2021 年和 2022 年实际田间试验数据,包括实测冠层覆盖度和地上部生物量等对模型数据参数进行调试与修改,使得模型模拟结果与实际测算结果符合,进而得出作物参数模块所需具体数据,如表 3 所示。

2.2.4 模型数据精度验证 采用 Nash 效率系数 (NSE)、决定系数 (R^2)、均方根误差 ($RMSE$) 来评价模型本地适用性和验证的精度,计算公式分别如式 (6)~(8):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

式中, x_i 和 S_i 为样本实测值; y_i 和 O_i 为样本模拟值; n 为实测样本数; \bar{x} 、 \bar{S} 为实测值的平均值; \bar{O} 为模拟值的平均值。

3 结果与分析

3.1 AquaCrop 模型实测校准验证

根据 2021 年和 2022 年实地试验验证,确定输入模型的积温参数,采用试错法结合已有的 AquaCrop 模型参数分析结果,对部分保守参数进行

校准,具体调整参数如表 3。通过 2021 年和 2022 年夏玉米实测产量数据对模型产量模块的标准水分生产力 (WP^*) 和参考收获指数 (HI_0) 进行校准与验证,设置模型自带玉米参数 $WP^* = 33.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,试错法测试参数 $WP^* = 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,陈超飞等^[23] 测算参数 $WP^* = 31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,模型自带玉米参数与陈超飞测算一致, $HI_0 = 41\%$,试错法测试参数 $HI_0 = 43\%$,累积 6 种情况分别验证结果。验证结果与误差统计如表 4 所示。

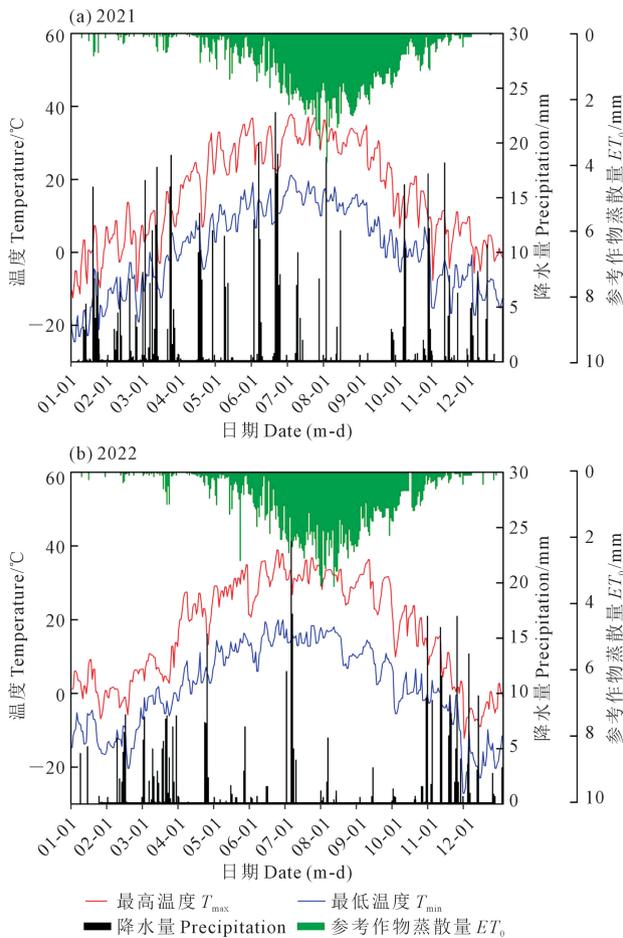


图 1 2021 年和 2022 年塔额盆地气象数据
Fig.1 Meteorological data of Ta'e Basin in 2021 and 2022

表 2 试验地土壤参数

Table 2 Soil parameters of experimental site

土层深度 Soil depth /cm	土壤质地 Soil texture	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%	田间持水量 Field capacity/%	凋萎含水量 Wilting moisture content/%	饱和含水量 Saturation moisture content/%	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
0~20	壤土 Loam	33.21	41.43	25.36	30.3	16.3	52.2	1.46	758.69
20~40	壤土 Loam	32.52	41.06	26.42	30.8	16.5	53.4	1.55	822.96
40~60	黏壤土 Clay loam	30.88	41.93	27.19	31.7	16.4	54.8	1.57	944.88
60~80	黏壤土 Clay loam	29.32	41.96	28.72	32.7	16.8	53.6	1.63	938.78
80~100	砂黏土 Sandy clay	29.87	41.09	29.04	33.1	16.8	52.4	1.59	879.28

表 3 AquaCrop 模型本地化校准参数

Table 3 Localization calibration parameters of AquaCrop model

模型模块 Model module	作物参数定义 Definition of crop parameters	单位 Unit	校准参数值 Calibration parameter values
作物生长 Crop growing	基底温度 Base temperature	°C	8
	上限温度 Upper temperature	°C	30
	作物系数 Crop coefficient		1.05
	冠层增长系数 Canopy growth coefficient	°C · d ⁻¹	0.016~0.017
	最大冠层覆盖度 Maximum canopy cover	%	90~94
	冠层衰减系数 Canopy decline coefficient	°C · d ⁻¹	0.012
	播种到出苗所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to emergence	°C · d	86
	播种到开花所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to start of flowering	°C · d	878
	播种到开始衰老所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to start of senescence	°C · d	1486
	播种到成熟所需有效积温 Effective cumulative temp. from sowing to maturity	°C · d	1882
土壤水分胁迫 Soil water drought stress (SWDT)	开花期有效积温 Effective cumulative temp. of the flowering stage	°C · d	216
	水分胁迫对冠层生长影响上限 SWDT for canopy expansion-upper threshold		0.116
	水分胁迫对冠层生长影响下限 SWDT for canopy expansion-lower threshold		0.575
	冠层扩张的水分胁迫形状因子 Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion		2.540
产量 Production	标准水分生产力 Water productivity normalized for ET_0 and CO_2	$g \cdot m^{-2}$	35
	参考收获指数 Reference harvest index	%	43

如表 4 所示,对不同产量模块参数设置下的产量进行模拟,其中 2021 年和 2022 年与实际值相对误差最小的两组均为 $WP^* = 33.7 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 与 $WP^* = 35.0 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$,相对误差分别为 4.08%、1.26% 和 2.91%、1.07%。由此可知, $WP^* = 33.7 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 与 $WP^* = 35.0 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 表现相对较好, $WP^* = 35.0 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 本地适用性稍强于 $WP^* = 33.7 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 。因此 AquaCrop 模型产量模块的标准水分生产力 (WP^*) 和参考收获指数 (HI_0) 分别选用 $WP^* = 35.0 g \cdot m^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 。

通过采用 2021 年和 2022 年夏玉米实测的作物生长和产量结果,对模型产量模块进行校准与验证,得到 A1、B1、C1、D1 和 E1 不同灌溉定额下冠层覆盖度及地上部生物量的校准结果,实测数据以每 10 d 为测取间隔,单个处理测取 13 次,并在 9 月 27 日收获前一天完成最后一次测取,结果如图 2~5 所示,校准误差结果列于表 5。

由表 5 可知,5 个灌溉定额下 2021 年冠层覆盖度的 NSE 、 R^2 、 $RMSE$ 分别为 0.877、0.906、12.49,2022 年冠层覆盖度的 NSE 、 R^2 、 $RMSE$ 分别为 0.859、0.886、13.59,表明该模型可以较为准确地模拟夏玉

表 4 产量模块验证及误差结果

Table 4 Production module verification and error results

年份 Year	产量模块 Production module		产量 Production/($t \cdot hm^{-2}$)		
	WP^* /($g \cdot m^{-2}$)	HI_0 /%	实际值 Actual value /($t \cdot hm^{-2}$)	模拟值 Simulated value /($t \cdot hm^{-2}$)	相对误差 Relative error /%
2021	31.0	41	9.579	8.761	8.54
	31.0	43	9.579	8.874	7.36
	33.7	41	9.579	9.072	5.29
	33.7	43	9.579	9.188	4.08
	35.0	41	9.579	9.173	4.24
	35.0	43	9.579	9.458	1.26
2022	31.0	41	9.012	8.256	8.39
	31.0	43	9.012	8.427	6.49
	33.7	41	9.012	8.539	5.25
	33.7	43	9.012	8.750	2.91
	35.0	41	9.012	8.728	3.15
	35.0	43	9.012	8.916	1.07

米在不同灌溉定额下冠层覆盖度的变化过程。5 个灌溉定额下 2021 年地上部生物量的 NSE 、 R^2 、 $RMSE$ 分别为 0.908、0.992、1.062,2022 年地上部生物量的 NSE 、 R^2 、 $RMSE$ 分别为 0.96、0.991、1.043,表明该模型可以准确地模拟夏玉米不同灌溉定额下地上部生物量的变化过程。

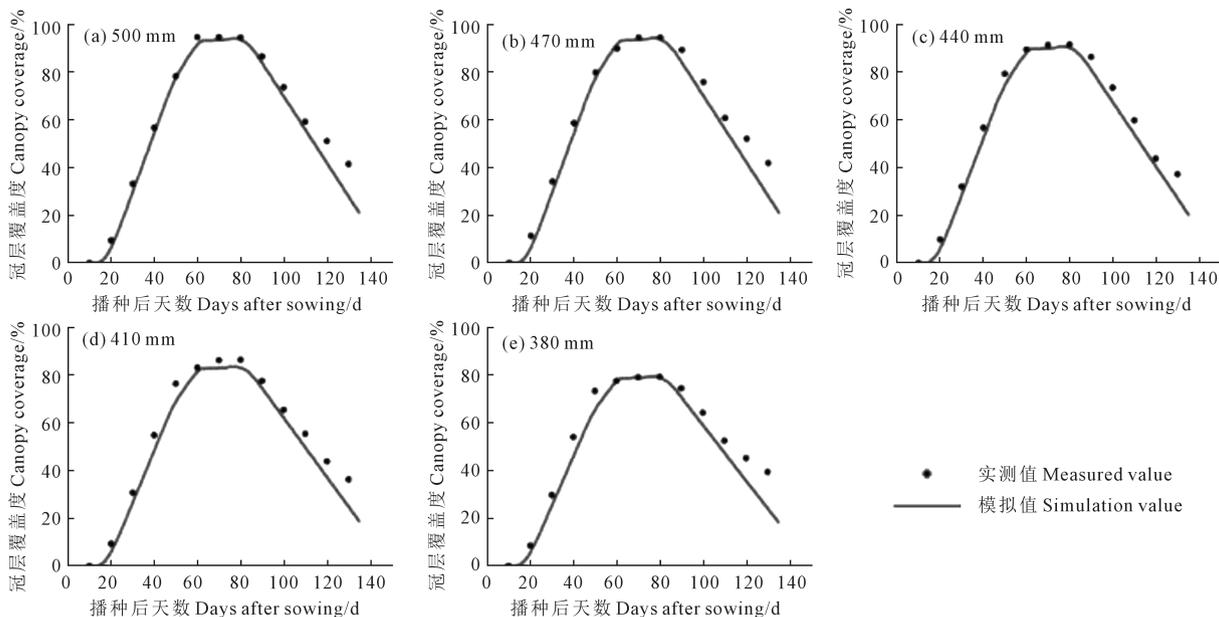


图 2 2021 年不同灌溉定额下冠层覆盖度校准

Fig.2 Canopy coverage calibration under different irrigation quotas in 2021

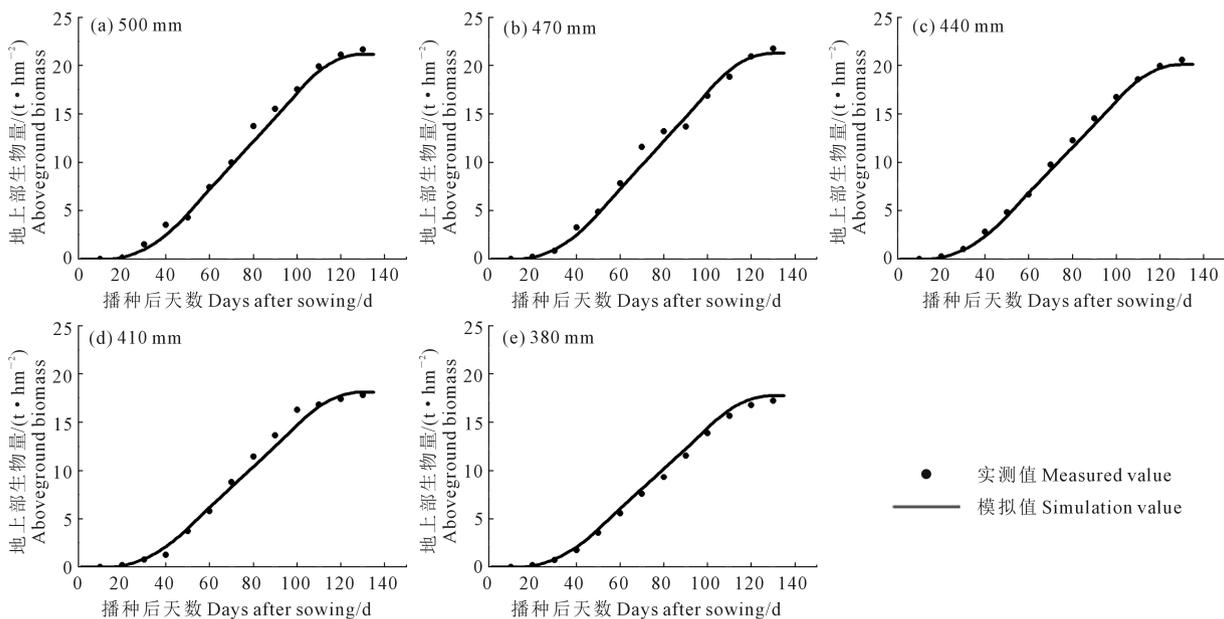


图 3 2021 年不同灌溉定额下地上部生物量校准

Fig.3 Calibration of aboveground biomass under different irrigation quotas in 2021

在 $WP^* = 35.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$ 的情况下,模拟 2021—2022 年 A1、B1、C1、D1 和 E1 处理的产量和最终生物量,将其与实际测算产量和最终生物量进行对比,如表 6 所示,2021 年与 2022 年产量与最终生物量模拟情况最好的处理均为 D1 处理。

3.2 不同灌溉方案下夏玉米的水分利用效率

如表 7 所示,对于两个起始灌水时间,作物水分利用效率均表现为:在灌水定额 470 mm 与 500 mm 处理下,灌水周期 7 d 与灌水 11 次的水分利用效率

高于灌水周期 10 d 与灌水 8 次,而在灌溉定额 380、410、440 mm 处理下,灌水周期 10 d 与灌水 8 次的水分利用效率均高于灌水周期 7 d 与灌水 11 次。起始灌水为 5 月 20 日时,D1 处理下夏玉米产量最高,为 $9.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,水分利用效率为 $2.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,A2 处理下水分利用效率最高,为 $2.072 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。5 月 30 日起始灌水的处理中,d1 处理下夏玉米产量最高,为 $9.125 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而水分利用效率为 $1.941 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

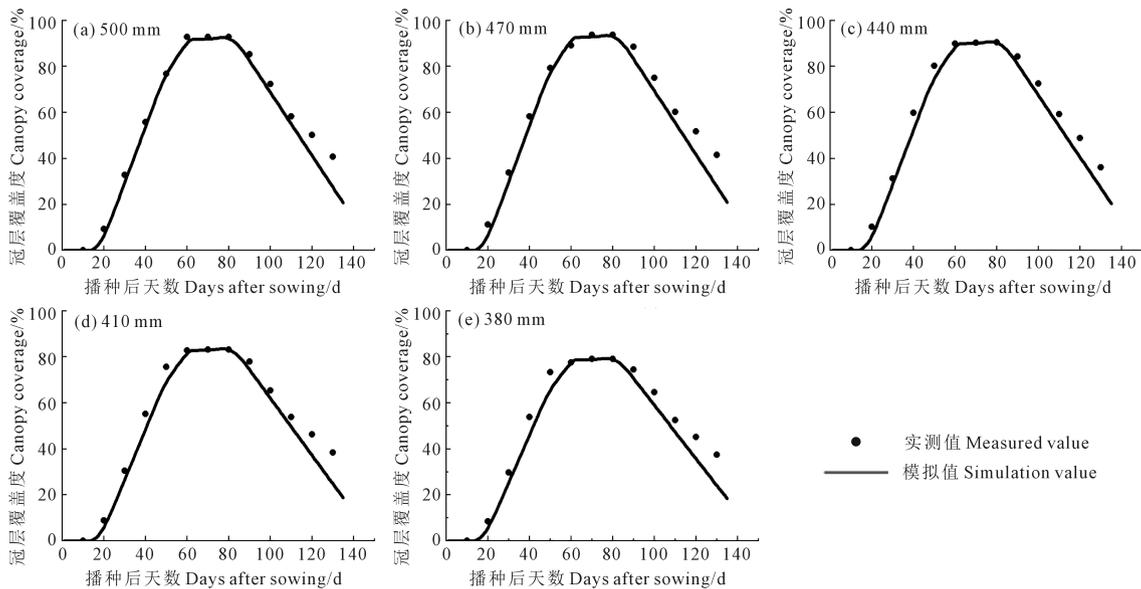


图 4 2022 年不同灌溉定额下冠层覆盖度校准

Fig.4 Canopy coverage calibration under different irrigation quotas in 2022

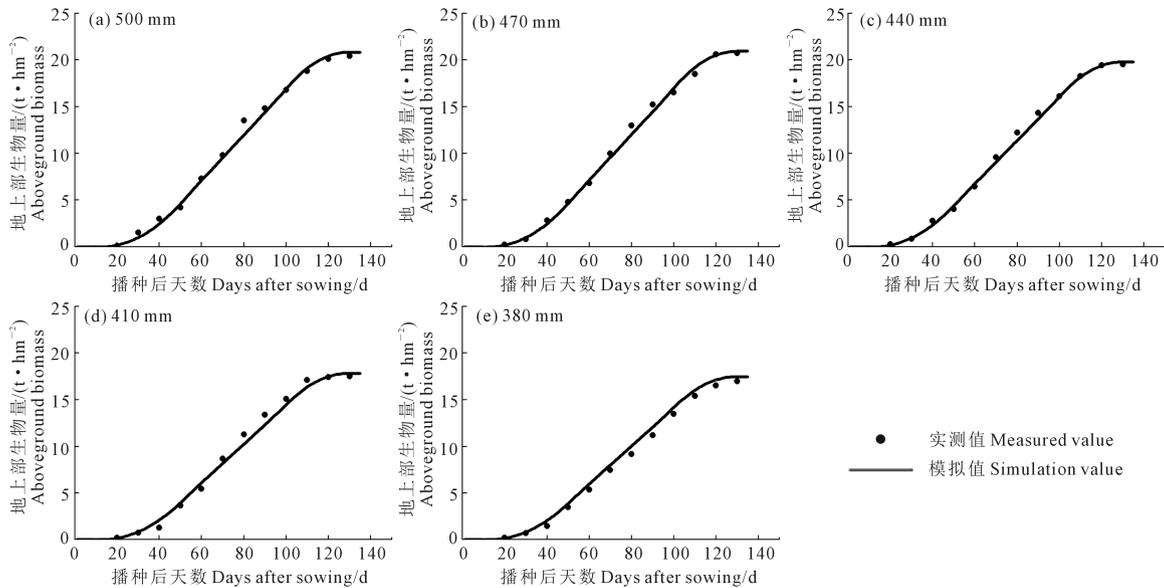


图 5 2022 年不同灌溉定额下地上部生物量校准

Fig.5 Calibration of aboveground biomass under different irrigation quotas in 2022

表 5 不同灌水定额下冠层覆盖度和地上部生物量校准误差结果

Table 5 Calibration error results of canopy coverage and aboveground biomass under different irrigation quotas

年份 Year	处理 Treatment	冠层覆盖度 Canopy cover			地上部生物量 Aboveground biomass		
		Nash 效率系数 NSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	Nash 效率系数 NSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE
2021	A1 *	0.827	0.882	11.27	0.938	0.991	1.283
	B1 *	0.832	0.861	11.46	0.856	0.997	1.275
	C1 *	0.898	0.926	13.75	0.847	0.987	0.869
	D1 *	0.901	0.968	12.59	0.973	0.989	0.986
	E1 *	0.927	0.893	13.42	0.925	0.995	0.899
	整体 Overall	0.877	0.906	12.49	0.908	0.992	1.062
2022	A1 *	0.857	0.827	12.38	0.987	0.982	0.959
	B1 *	0.834	0.885	12.58	0.928	0.988	0.892
	C1 *	0.826	0.897	12.97	0.965	0.992	1.074
	D1 *	0.881	0.942	15.28	0.958	0.997	1.201
	E1 *	0.897	0.881	14.74	0.964	0.994	1.088
	整体 Overall	0.859	0.886	13.59	0.96	0.991	1.043

表 6 夏玉米产量与最终生物量的实测值和模拟值及相对误差

Table 6 Actual and simulated values and relative errors of yield and final biomass

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield			最终生物量 Biomass		
		实测值/(t·hm ⁻²) Measured value	模拟值/(t·hm ⁻²) Simulated value	相对误差 Relative error/%	实测值/(t·hm ⁻²) Measured value	模拟值/(t·hm ⁻²) Simulated value	相对误差 Relative error/%
2021	A1 *	8.442	8.589	1.741	17.24	17.776	3.109
	B1 *	8.988	9.158	1.891	17.81	18.139	1.847
	C1 *	9.434	9.579	1.537	20.62	20.132	-2.367
	D1 *	9.892	9.865	-0.273	21.78	21.297	-2.218
	E1 *	9.952	9.787	-1.658	21.68	21.192	-2.251
2022	A1 *	7.861	7.947	1.094	16.96	17.479	3.060
	B1 *	8.031	8.147	1.444	17.52	17.836	1.804
	C1 *	8.916	9.012	1.077	19.52	19.795	1.409
	D1 *	9.483	9.533	0.527	20.75	20.941	0.920
	E1 *	9.252	9.402	1.621	20.40	20.837	2.142

表 7 不同灌溉方案下夏玉米水分利用效率模拟结果

Table 7 Simulation results of water use efficiency of summer maize under different irrigation schemes

起始灌水时间 Initial irrigation time (m-d)	处理 Treatment	最终产量 Yield/(t·hm ⁻²)	最终生物量 Biomass/(t·hm ⁻²)	灌溉定额 Irrigation quota/mm	作物水分利用效率 Water use efficiency /(kg·m ⁻³)
05-20	A1 *	7.861	17.482	380	2.069
	A2	7.872	17.238	380	2.072
	B1 *	8.031	17.846	410	1.959
	B2	8.047	17.794	410	1.963
	C1 *	8.916	19.814	440	2.026
	C2	8.926	19.835	440	2.029
	D1 *	9.423	20.941	470	2.005
	D2	9.262	20.583	470	1.971
	E1 *	9.382	20.848	500	1.876
05-30	E2	9.144	20.322	500	1.829
	a1	7.551	16.784	380	1.987
	a2	7.569	16.547	380	1.992
	b1	7.709	17.133	410	1.880
	b2	7.788	17.085	410	1.900
	c1	8.555	19.011	440	1.944
	c2	8.859	19.043	440	2.013
	d1	9.125	20.154	470	1.941
	d2	8.897	19.762	470	1.893
e1	9.018	20.014	500	1.804	
e2	8.782	19.515	500	1.756	

3.3 不同灌溉方案下夏玉米的节水量

如表 8 所示,在总播种面积为确定值的情况下,夏玉米产量随着灌溉定额的增加而增加,灌溉定额为 440 mm 时增加明显,灌溉定额减少到 410 mm 以下时,产量差距较小。在 2022—2025 年塔额盆地灌溉水有效利用系数不同的条件下,选择的 D1 处理节水量分别为 2.1338×10^5 、 2.1826×10^5 、 2.1992×10^5 m³ 和 2.2306×10^5 m³。

4 讨论

4.1 不同灌溉方案可能对夏玉米存在的影响

玉米作为一种喜温作物,适期播种与灌水能够帮助夏玉米充分利用光、温条件,使得夏玉米生长

发育处于有利环境,进而实现夏玉米产量的提高。塔额盆地在 5 月 20 日前后最高气温已经可以达到 31℃,生育期内日照时数充足,更加有利于玉米产量的提高,而生育期内玉米积温条件充足可以使得幼苗成长为更加抗虫害的壮苗^[22]。5 月 20 日起始灌水时间的 AquaCrop 模型模拟产量普遍高于 5 月 30 日起始灌水时间的模拟产量,灌溉水分利用效率亦是如此,而随着灌溉定额减小相对于 5 月 20 日开始灌水,同灌溉定额条件下,不同灌水次数与灌水周期的灌溉水分利用效率差距也逐渐变大。因此,在该模型模拟结果下,5 月 20 日起始灌水时间可以充分利用积温条件,产量与作物水分利用效率也相对更高^[24]。通过 AquaCrop 模型模拟不同灌溉方案下

表 8 不同灌溉方案下夏玉米产量与节水总量模拟结果

Table 8 Simulation results of yield and total water saving of summer maize under different irrigation schemes

起始灌水时间 (m-d) Initial irrigation time	处理 Treatment	产量 Yield/(10 ⁴ t)	节水总量 Total water saving/(10 ⁴ m ³)			
			$\eta_{2022} = 0.600$	$\eta_{2023} = 0.605$	$\eta_{2024} = 0.610$	$\eta_{2025} = 0.615$
05-20	A1 *	128.396	34.320	36.084	36.678	37.810
	A2	128.576	34.320	36.084	36.678	37.810
	B1 *	131.173	32.820	34.138	34.577	35.409
	B2	131.434	32.820	34.138	34.577	35.409
	C1 *	145.628	28.740	29.626	29.921	30.475
	C2	145.791	28.740	29.626	29.921	30.475
	D1 *	153.909	21.338	21.826	21.992	22.306
	D2	151.279	21.338	21.826	21.992	22.306
	E1 *	153.239	9.524	9.686	9.740	9.841
	E2	149.352	9.524	9.686	9.740	9.841
05-30	a1	123.333	34.320	36.084	36.678	37.810
	a2	123.627	34.320	36.084	36.678	37.810
	b1	125.913	32.820	34.138	34.577	35.409
	b2	127.204	32.820	34.138	34.577	35.409
	c1	139.731	28.740	29.626	29.921	30.475
	c2	144.697	28.740	29.626	29.921	30.475
	d1	149.041	21.338	21.826	21.992	22.306
	d2	145.317	21.338	21.826	21.992	22.306
	e1	147.294	9.524	9.686	9.740	9.841
	e2	143.439	9.524	9.686	9.740	9.841

的夏玉米产量,进行作物水分利用效率计算,分析结果发现,由于塔额盆地本身积温资源丰富,灌水时间相对提前可以充分利用积温资源,进而提高夏玉米产量。

4.2 AquaCrop 模型的本地化校准过程

通过利用 AquaCrop 模型模拟塔额盆地夏玉米生长过程,并与实际值校准验证,发现夏玉米冠层覆盖度、地上部生物量和最终产量的模拟值与实测值一致性较高,模拟相对误差值较低,与国内外的研究成果相符合。陈超飞等^[23]验证模型在关中地区的适用性,通过 R^2 、 $RMSE$ 和 E_{NS} (纳什效率系数)验证冠层覆盖度和地上部生物量,分别为 0.868、11.83%、0.743 和 0.975、0.970 t·hm⁻²、0.968。倪玲等^[25]验证了该模型在黄土塬区的适用性,通过比较模拟和实测的夏玉米产量和地上部生物量的 R^2 分别为 0.972 和 0.784,结果与本文相同,AquaCrop 模型对夏玉米产量的模拟效果优于地上部生物量的模拟效果。孙哲等^[26]通过该模型模拟高台县制种玉米和商品玉米的产量,用来评估模型的产量模拟精度,制种玉米和商品玉米的产量实测值与模拟值的最大误差分别为-3.34%和-5.78%,表明 AquaCrop 模型在水分胁迫下对玉米的模拟性能较好。

通过分析实测结果与模拟值,也反映出 AquaCrop 模型的一些不足,模型在特低水情况下模拟值与实测值相对误差较大,表示其灌溉定额在远

低于合适灌溉定额时,模拟效果误差较大,与 Zhang 等^[27]研究结果一致;而模型普遍低估夏玉米衰落期的冠层覆盖度,这与模型模拟原理相关,模型植物冠层部分与作物蒸腾 T_r 相关联,在此过程中,气候条件出现极端变化,模型无法及时做出反应,从而造成作物蒸腾 T_r 不够准确,这也表现出冠层覆盖度在 AquaCrop 模型中的重要性,具体体现在夏玉米生育期后期塔额盆地降水量较多,而日照时数较少,玉米的衰老得到了延缓,这也表明了模型对于玉米衰老期的水分胁迫响应强烈。

4.3 夏玉米节水潜力分析

现阶段影响塔额盆地节水工作的主要问题在于不合理的灌溉定额。本文通过利用 AquaCrop 模型模拟作物生长,在保证作物产量不减少的情况下合理利用农业水资源,优化灌溉制度。塔额盆地现阶段缺乏对农业可回收水量的利用,由于灌溉工程不到位,灌溉末端的农田通常会因为轮灌晚而缺水,无法得到及时灌溉,如果对灌区进行节水工程改造,进而提高灌溉水利用系数,减少输水损失,可以在不增加灌溉总水量的情况下实现灌溉面积的增加,进而实现节水。以本文为基础,可以模拟分析塔额盆地其他作物的节水潜力,进而提出塔额盆地其他作物的具体节水潜力。但本研究尚未考虑作物生长环境的空间变化,在后续研究中有待于进一步完善和优化。

5 结 论

1) 通过实地试验对 AquaCrop 模型产量模块参数 WP^* 和 HI_0 进行参数率定, 选择 $WP^* = 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $HI_0 = 43\%$, 其参数 2021 年和 2022 年产量模拟相对误差值分别为 1.26% 和 1.07%。

2) 结合模型模拟结果, 推荐塔额盆地夏玉米起始灌水时间为 5 月 20 日, 灌溉定额 470 mm, 灌水周期 7 d, 灌水 11 次。此方案下, 作物水分利用效率 $2.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 产量 $9.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3) 在确定夏玉米播种面积为 1633 hm^2 的前提下, 与目前应用的 517.5 mm 夏玉米灌溉定额所用水量相比, 起始灌水时间为 5 月 20 日, 灌溉定额为 470 mm, 灌水周期 7 d, 灌水 11 次, 2022—2025 年可分别节水 2.1338×10^5 、 2.1826×10^5 、 2.1992×10^5 、 $2.2306 \times 10^5 \text{ m}^3$, 灌溉水有效利用系数分别为 0.600、0.605、0.610、0.615。

参 考 文 献:

- [1] 刘振, 宁堂原. 黄淮海平原灌区节水高效耕作制度构建[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 31-40.
LIU Z, NING T Y. Construction of water-saving and efficient farming system in irrigation area of the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 31-40.
- [2] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 366-379.
SUN Y N, LI X Y, SHI H B, et al. Evolution mechanism of soil salinization in Hetao irrigation district under condition of water-saving reform based on remote sensing technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 366-379.
- [3] 张欣, 张保祥, 李冰, 等. 基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 95-106.
ZHANG X, ZHANG B X, LI B, et al. Evaluation and application of regional water saving based on water quota[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 95-106.
- [4] 徐昆, 朱秀芳, 刘莹, 等. 气候变化下干旱对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 149-158.
XU K, ZHU X F, LIU Y, et al. Effects of drought on maize yield under climate change in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 149-158.
- [5] 徐志鹏, 穆奎, 董文俊, 等. 关中地区播前土壤墒情对覆膜旱作夏玉米产量和水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 123-134, 143.
XU Z P, MU K, DONG W J, et al. Effects of soil moisture content before sowing on summer maize yield and water use under plastic mulching in Guanzhong region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 123-134, 143.
- [6] 刘兴冉, 沈彦俊. AquaCrop 模型在华北平原夏玉米水分研究中的应用[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 371-375.
LIU X R, SHEN Y J. Application of AquaCrop model for simulating the summer maize water use in North China plain[J]. Research of Agricul-

- tural Modernization, 2014, 35(3): 371-375.
- [7] 韩桐, 赵悦航, 黄晶, 等. AquaCrop 模型在华北平原黑龙港流域典型区冬小麦-夏玉米种植模式上的适用性评价[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 10-17.
HAN T, ZHAO Y H, HUANG J, et al. Applicability evaluation of AquaCrop model for winter wheat & summer maize cropping system in the Heilonggang River Valley [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 10-17.
- [8] 潘海福, 戴飞, 史瑞杰, 等. 基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 78-86.
PAN H F, DAI F, SHI R J, et al. Soil moisture modeling of corn full-film double ridge ditch sowing based on AquaCrop model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 78-86.
- [9] WANG H D, CHENG M H, LIAO Z Q, et al. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes [J]. Agricultural Water Management, 2023, 276: 108076.
- [10] 杨广, 雷杰, 孔春贤, 等. 膜下滴灌水盐矿化度对棉花生长的影响及 AquaCrop 模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 83-92.
YANG G, LEI J, KONG C X, et al. Effects of water salinity on cotton growth in mulched drip irrigation and its simulation by AquaCrop model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 83-92.
- [11] 马于茗, 陈捷, 金志凤, 等. 基于 AquaCrop 模型的茶叶产量和开采期预报[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1339-1349.
MA Y M, CHEN J, JIN Z F, et al. Prediction of tea yield and picking date based on the AquaCrop model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1339-1349.
- [12] ZHANG C, XIE Z A, WANG Q J, et al. AquaCrop modeling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity [J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107580.
- [13] 薛亚荣, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 塔城地区棉花生育期需水量变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1192-1198.
XUE Y R, BUCK B, LUO N N, et al. Climate response to water demand of cotton plant in growing season in Tacheng Prefecture [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1192-1198.
- [14] 柴顺喜, 陈锐, 李杰, 等. AquaCrop 模型在北疆滴灌春小麦生产中的校准及验证[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 215-219.
CHAI S X, CHEN R, LI J, et al. Calibration and verification of AquaCrop model in drip irrigation spring wheat production in Northern Xinjiang [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(8): 215-219.
- [15] 常梅, 周青云, 尹林萍. 不同灌溉方式和灌水定额对夏玉米生长的影响及 AquaCrop 模型的适应性研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 32-39.
CHANG M, ZHOU Q Y, YIN L P. Research of the effects of different drip irrigation treatments on the growth of summer maize and the adaptability of AquaCrop model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 32-39.