

基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究

潘海福¹ 戴飞¹ 史瑞杰¹ 王锋¹ 邓浩亮² 马明生³

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 河西学院土木工程学院, 张掖 734000;
3. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070)

摘要: 采用以水为驱动力的 AquaCrop 模型对定西市 2016—2020 年玉米全膜双垄沟播技术模拟产量进行研究, 分别建立 I₁ (裸地种植)、I₂ (覆膜率为 45% 的窄膜种植)、I₃ (覆膜率为 81.8% 的宽膜种植)、I₄ (覆膜率为 100% 全膜双垄沟播技术种植) 4 种植模式, 对比分析 4 种模式的产量优越性与环境适应性, 得出播种日期以及降雨量与土壤含水率关系。AquaCrop 模拟结果表明, 该模型适宜模拟定西市旱作农业, I₄ 模式产量模拟值和实测值之间皮尔逊相关系数(*r*) 均大于 0.91、均方根误差 (RMSE) 为 0.1~0.24、归一化均方根误差 (CV(RMSE)) 为 1.66%~2.10%、纳什效率系数 (EF) 均大于 0.9、一致性指数 (*d*) 大于 0.94。定西市最佳播种日期选取平均气温稳定在 15℃ 左右 (每年 4 月 15—25 日左右), 该时段播种后产量最高, 种植模式 I₄ 产量、地上生物量、水分生产力比种植模式 I₁ 分别高 84.01%、19.79%、101.13%, 比种植模式 I₂ 分别高 82.26%、19.74%、85.47%, 比种植模式 I₃ 分别高 63.26%、14.80%、82.63%; 干旱年种植模式 I₄ 土壤总含水率比 I₁、I₂、I₃ 模型均高 90% 以上, 丰水年均高 80% 以上; 2000—2020 年间耗水量大于有效降雨量有 7 a, 耗水量小于有效降雨量有 13 a, 模拟结果表明全膜双垄沟播技术耗水量与降雨量持平, 不会透支土壤水分。

关键词: 旱区农业; 全膜双垄沟播技术; 玉米; AquaCrop 模型

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0078-09

Soil Moisture Modeling of Corn Full-film Double Ridge
Ditch Sowing Based on AquaCrop Model

PAN Haifu¹ DAI Fei¹ SHI Ruijie¹ WANG Feng¹ DENG Haoliang² MA Mingsheng³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China
2. College of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, China
3. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The AquaCrop model driven by water was used to study the simulated yield of full film double ridge sowing technology of corn in Dingxi City from 2016 to 2020, and I₁ (bare land planting), I₂ (narrow film planting with 45% mulching rate), I₃ (wide film planting with 81.8% mulching rate) and I₄ (full film double ridge planting with 100% mulching rate) were established respectively. The yield superiority and environmental adaptability of the four models were compared and analyzed, The relationship between sowing date, rainfall and soil moisture was obtained. The results of AquaCrop simulation showed that the model was suitable for simulating dry farming in Dingxi City. The Pearson correlation coefficient (*r*) between the output simulation value and the measured value of I₄ model was greater than 0.91, the root mean square error (RMSE) was 0.1~0.24, the normalized root mean square error (CV(RMSE)) was 1.66%~2.10%, the Nash efficiency coefficient (EF) was greater than 0.9, and the consistency index (*d*) was greater than 0.94. The average temperature of the best sowing date in Dingxi City was stable at about 15℃ (about April 15–25 every year). The yield after sowing was the highest in this period. The yield, aboveground biomass and water productivity of the planting mode I₄ model were 84.01%, 19.79%

收稿日期: 2022-06-02 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52065005, 51775115)、甘肃省杰出青年基金项目 (20JR10RA560)、中国博士后科学基金项目 (2021M700741) 和甘肃省自然科学基金项目 (20JR5RA029)

作者简介: 潘海福 (1997—), 男, 硕士生, 主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究, E-mail: 3024832135@qq.com

通信作者: 戴飞 (1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究, E-mail: daifei@gsau.edu.cn

and 101.13% higher than that of the planting mode I_1 model, 82.26%, 19.74% and 85.47% higher than that of the planting mode I_2 model, and 63.26%, 14.80% and 82.63% higher than that of the planting mode I_3 model, respectively. The total soil water content of I_4 model in dry years was more than 90% higher than that of I_1 , I_2 and I_3 models, and more than 80% higher in wet years. From 2000 to 2020, the water consumption was higher than the effective rainfall for seven years, and the water consumption was lower than the effective rainfall for 13 years. The simulation results showed that the water consumption of the full film double ridge sowing technology was equal to the rainfall, and the soil water would not be overdrawn.

Key words: agriculture in dry areas; full-film double ridge furrow sowing technology; corn; AquaCrop model

0 引言

定西是典型的黄土地貌地区,为大陆季风气候,该地区光热资源丰富、气候生产潜力可观,但水资源供给严重不足,每公顷水资源量占全球平均水平的67%,并且时空分布不均,农业用水占总用水量的90%,水资源利用率低下,水土流失严重,限制了西北地区农业的生产发展,旱作节水农业方向研究已刻不容缓^[1-3]。

随着农业技术的发展,西北地区普遍存在着4种植植模式:裸地种植、覆膜率为45%的窄膜种植、覆膜率为81.8%的宽膜种植、覆膜率为100%的全膜双垄沟播技术种植^[4-6]。文献[7]针对“十年九旱”的西北旱区雨养农业提出玉米全膜双垄沟播技术,该技术具有覆盖抑蒸、垄沟集雨、垄沟种植等特点,可实现蓄水保墒、集流入渗、雨水富集叠加、保水保肥,增加地表温度、提高水肥利用率,减少田间杂草和病虫害等功能^[8-12]。目前,模拟作物生长和产量的模型主要有 Wageningen、DSSAT、WOFOST、CropSyst、AquaCrop 模型等^[13-17],其中 AquaCrop 模型是由世界粮农组织提出的关于作物生长水分驱动模型,该模型数据输入简洁、用户界面友好、数据输出准确^[18],主要以水为驱动力,确定水分生产力,是唯一一款将土壤蒸发和作物蒸腾分开的模拟软件^[19-20]。近年来,文献[21-24]利用 AquaCrop 模型对旱区覆膜玉米种植有较为成熟的研究,张涛等^[25]利用 AquaCrop 模型对旱地全膜双垄沟玉米生产进行了模拟及管理措施优化。本文拟采用以水为驱动力的 AquaCrop 模型对定西市 2016—2020 年玉米全膜双垄沟播技术产量进行模拟研究,分别建立 I_1 (裸地种植)、 I_2 (覆膜率为45%的窄膜种植)、 I_3 (覆膜率为81.8%的宽膜种植)、 I_4 (覆膜率为100%全膜双垄沟播技术种植)4种植植模式,对比分析4种模式的产量优越性与环境适应性,分析该地区最佳播种时间、土壤总含水量以及耗水量与有效降雨量之间的关系,以期玉米全膜双垄沟在定西市的

种植提供相应技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016—2020年在甘肃省定西市干旱试验站(104°62'E, 35°58'N)进行,海拔1 894.5 m,属于典型的黄土高原半干旱气候,年平均气温为6.7℃,年降雨量为386.6 mm,主要集中在7—9月,且多以暴雨的形式出现,蒸发量高达1 400 mm以上,春季干旱少雨,太阳总辐射为5 923.8 MJ/m²,无霜期为140 d左右,土壤为黄绵土,地下水大于10 m,地表径流大,水土流失严重,是典型的雨养农业区。

1.2 研究材料与方法

1.2.1 试验材料

选用玉米品种为“先玉335”,播前选用旋耕,4种植植模式如图1所示,种植模式参数如表1所示。

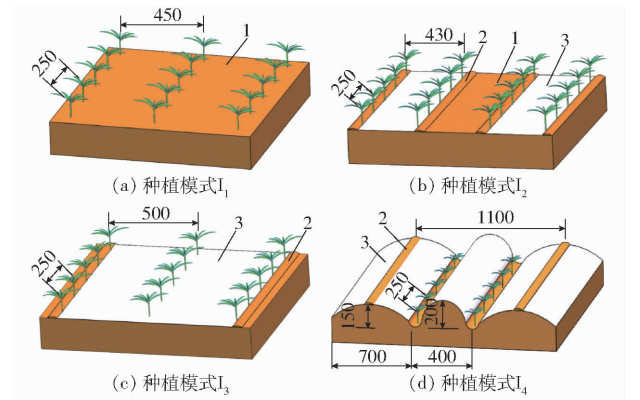


图1 4种植植模式示意图

Fig. 1 Schematics of four planting patterns
1. 裸地 2. 覆土带 3. 地膜

1.2.2 AquaCrop 模型原理

AquaCrop 是一个描述植物和土壤之间相互作用的作物生长模型,植物从根区提取水分和养分,并考虑具有影响相互作用的田间管理(如土壤肥力)和灌溉管理(雨养农业不考虑灌溉管理)。为了广泛应用 AquaCrop 模型,仿真时只需导入少量显式参数和大多数直观输入变量,决定模型中作物生长环境。AquaCrop 模型是从 K_y 方法演变而来,将实际

表 1 4 种植模式参数
Tab.1 Parameters of four planting patterns

种植模式	耕作方式	覆膜方式	覆膜率/%	播种方式	行距/mm	株距/mm
I ₁	平作	不覆膜	0	直接播种	400 ~ 500	200 ~ 300
I ₂	平作	450 mm 窄膜	45.5	膜内播种	400 ~ 500	200 ~ 300
I ₃	平作	1 200 mm 宽膜	81.8	膜内播种	400 ~ 500	200 ~ 300
I ₄	全膜双垄沟	1 200 mm 宽膜	100	垄沟播种	400 ~ 500	200 ~ 300

蒸散(E_T)分离为土壤蒸发(E)和作物蒸腾(T_r),将最终产量(Y)分离为生物量(B)和收获指数(H_I),计算式为

$$E_T = E + T_r \tag{1}$$

$$Y = H_I B \tag{2}$$

将土壤水分分离为土壤蒸发和作物蒸腾,避免了非生产性耗水(土壤蒸发)的混杂效应,特别是当种植初期或稀疏种植导致地面覆盖不完整时具有非常重要的作用。将产量分离为生物量和收获指数,可以根据环境条件划分相应的函数关系。分离避免了水分胁迫对 B 和 H_I 的混杂影响。上述变化导出 AquaCrop 增长引擎公式为

$$B = W_p \sum T_r \tag{3}$$

式中 W_p ——水分生产率参数

1.2.3 AquaCrop 模型的校准与评估

部分非限制性参数需要随着试验地理环境、不同种植模式以及田间管理水平差异进行校准。为了使模型能够较好适应试验地,利用校准后的模型进行模拟仿真,得到的数据与大田试验数据进行比较分析,以此来评估模型性能。采用皮尔逊相关系数(r)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差

(CV(RMSE))、纳什效率系数(EF)和一致性指数(d)对模型的模拟精度进行检验。

在模拟评价测试中, r 取值为 $-1 \sim 1$, r 越靠近 1 表示模拟值与真实值越接近,模拟效果更好^[19]; RMSE 取值为 $0 \sim +\infty$,值越接近 0 模拟效果越好; CV(RMSE)取值小于 10% 表示模拟效果优秀,在 10% ~ 20% 时模拟效果良好,在 20% ~ 30% 时模拟效果一般^[20]。EF 和 d 取值越接近 1 则模拟效果越好。

1.3 数据来源

利用 AquaCrop 模型模拟需要气象、作物、土壤和管理数据等,模拟完成后会输出产量、冠层覆盖度、收获指数、土壤含水率、地上生物量等。为了提高作物模拟精度,选用时间步长为 1 d,模型中输入的气象数据来自国家气象数据网。气象数据主要包括日最低气温 $T_n(^{\circ}\text{C})$ 、日最高气温 $T_x(^{\circ}\text{C})$ 、日降雨量(mm)、日照时数(h)、距地面 2 m 处的风速(m/s)、参考作物蒸散量(利用 AquaCrop 模型自带的 ETo 计算器计算求出),大气 CO₂ 浓度采用 AquaCrop 模型中自带的推荐值,气象数据如图 2 所示。

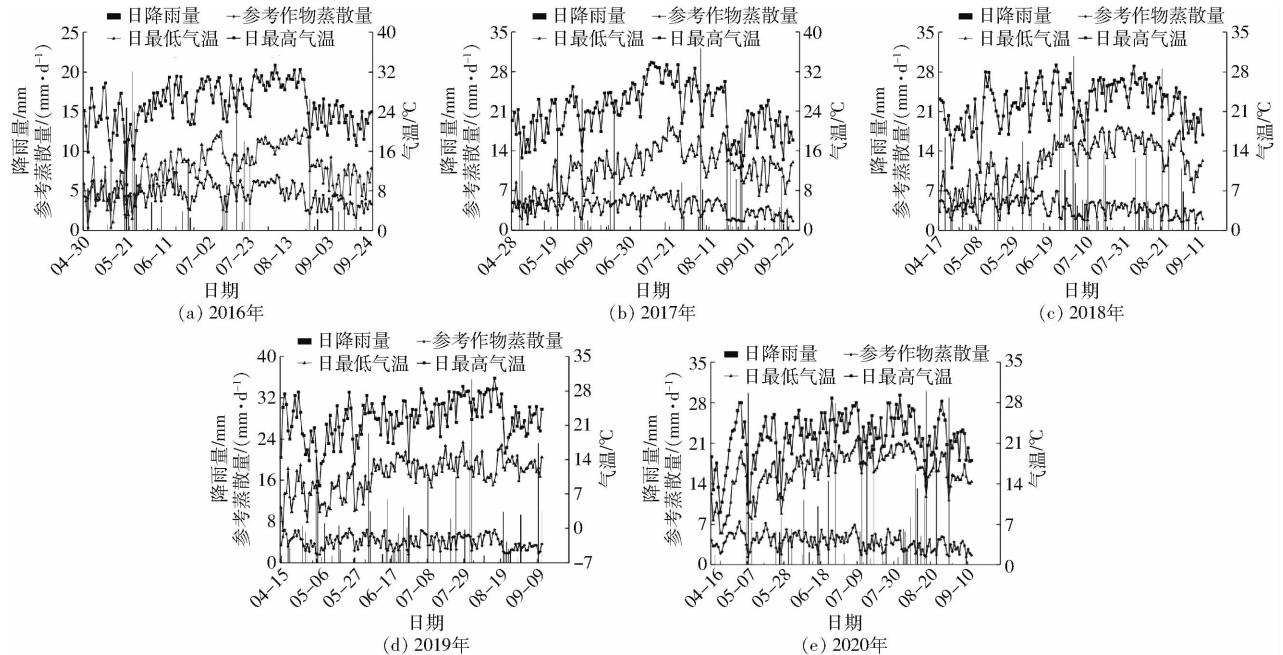


图 2 试验站玉米生育期气象数据

Fig.2 Meteorological data of maize growth period in experimental station

土壤数据中主要由土壤剖面数据和地下水数据组成。土壤剖面数据包括土层厚度、质地、容重、凋萎系数、田间持水量、饱和含水率、饱和水力传导度，如表 2 所示。地下水深度超过模型设定范围最大值，不考虑对作物影响。

表 2 定西试验站土壤理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of soil in Dingxi experimental station

土层 厚度/ cm	质地	容重/ (g·cm ⁻³)	凋萎 系数/ %	田间 持水量/ %	饱和 含水率/ %	饱和和水力 传导度/ (mm·d ⁻¹)
0~20	壤土	1.08	7.68	26.05	55.25	250
20~100	粉砂壤土	1.23	7.13	26.45	43.61	150

利用 AquaCrop 模型中自带的玉米参数,根据当地玉米种植密度和种植方式对模型中参数:种植密度、播种时间、初始冠层覆盖度、最大冠层覆盖度、生长周期、开花周期和各生育期进行校正,根据当地实际种植情况确定作物收获指数。

现场管理数据根据当地实际种植进行输入,全膜双垄沟播技术种植模式在模型中设置垄作,无地表径流,地膜覆盖率为 100%,材料为聚乙烯塑料薄膜,无灌溉,无杂草相对覆盖范围,根据当地玉米最大相对地上生物量来调整土壤肥力。

通过对典型旱作农业区定西基于过去 5 a 的气象数据,利用已校准和验证的 AquaCrop 模型模拟玉米生长规律,研究玉米产量、总蒸发量、土壤层总含水率、植被耗水量的变化规律。

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型的校准与适用性分析

利用 AquaCrop 模型对定西市典型干旱区玉米种植进行模拟,导入从中国气象数据网获取的定西市 2016—2020 年气象资料,采用试错法校正玉米参数,通过对 2016—2020 年玉米产量模拟值与大田实验值比较分析,调整模型中玉米参数,使玉米的模拟值与大田试验值相符合。

2016—2020 年定西市玉米全膜双垄沟播种植的产量相对误差均在 10% 以内,采用 AquaCrop 模型可以较精确地模拟定西市典型干旱区玉米的产量和其他各项指标。根据 AquaCrop 模型对定西市 2016—2020 年玉米全膜双垄沟播种植技术产量模拟,如表 3 所示,模型对旱区玉米全膜双垄沟播技术模拟精度较好。丁奠元等^[26]利用 AquaCrop 模型模拟地膜覆盖积温补偿效应,1.2 m 土层土壤贮水量的 R^2 为 0.10 ~ 0.94, RMES 为 14.3 ~ 28.9 mm, NRMSE 为 4.5% ~ 9.6%;张涛等^[25]利用 AquaCrop

模型模拟旱地全膜双垄沟玉米栽培产量的总体标准化均方根误差、符合度分别为 8.5%、0.97;上述研究与本研究表明 AquaCrop 模型能较好地模拟旱地覆膜种植作物生长状态。

表 3 定西市玉米全膜双垄沟播技术产量模拟精度分析

Tab.3 Analysis of yield simulation precision of corn full-film double ridge furrow sowing technology in Dingxi City

年份	r	RMSE	CV(RMSE)/%	EF	d
2016	0.93	0.10	1.66	0.94	0.91
2017	0.89	0.24	2.10	0.91	0.90
2018	0.91	0.18	1.87	0.90	0.92
2019	0.93	0.22	1.98	0.94	0.93
2020	0.92	0.18	1.68	0.93	0.90

2.2 AquaCrop 模型确定播种时间

马国胜等^[27]研究播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响,得到播种日期对玉米群体生理指标的总影响效应显著大于密度。玉米播种时间受气温影响很大,定西市由于海拔高,气温低,播种时间一般在 4 月末到 5 月初。玉米播种以后,只有在地表以下 10 cm 地温稳定在 12℃ 时,7 d 后才会达到发芽,如温度太低,玉米种子在土壤里的时间过长,就会影响种子发芽率或者发芽后形成弱苗。播种过早不但产量偏低,而且加大病虫害发生率;播种过迟,导致玉米生长周期短,玉米籽粒不饱满,产量降低。播种期前的降雨量也会影响种子发芽时间,播种后有一个吸涨阶段,如果土壤含水率太低会影响种子发芽时间。用校正过的 AquaCrop 模型模拟出最佳播种时间,以提高当地的产量,模拟结果如表 4 所示。

由表 4 可得,2016 年模拟最佳播种日期为 4 月 30 日,日平均气温为 22.8℃;2017 年模拟最佳播种日期为 4 月 28 日,日平均气温为 20.2℃;2018 年模拟最佳播种日期为 4 月 17 日,日平均气温为 19.2℃;2019 年模拟最佳播种日期为 4 月 15 日,日平均气温为 10.1℃,而 4 月 14 日平均气温为 17℃,4 月 16 日平均气温为 18℃;2020 年模拟最佳播种日期为 4 月 16 日,日平均气温为 13.2℃,4 月 17 日平均气温为 17.1℃。由以上数据规律看出,当日平均气温稳定在 15℃ 左右时(4 月 15—25 日左右)播种为最佳。播种前降雨量对播种日期影响不大,如表 5 所示,2016—2018 年最佳播种日期随播种期前降雨量增加有所提前,2019 年播种期前降雨量较其他 4 年最少,而最佳播种日期最早,2020 年播种期前降雨量在 2016 年和 2017 年之间,最佳播种日期均比 2016、2017 年提前。

表 4 2016—2020 年不同播种日期平均气温与产量关系

Tab. 4 Relationship between average temperature and yield on different sowing dates from 2016 to 2020

日期	2016 年		2017 年		2018 年		2019 年		2020 年	
	平均气温/	产量/	平均气温/	产量/	平均气温/	产量/	平均气温/	产量/	平均气温/	产量/
	℃	(t·hm ⁻²)	℃	(t·hm ⁻²)	℃	(t·hm ⁻²)	℃	(t·hm ⁻²)	℃	(t·hm ⁻²)
4 月 13 日	12.4	11.80	14.5	12.01	4.1	12.70	8.2	12.38	13.4	12.01
4 月 14 日	17.9	11.83	16.8	12.08	9.3	12.69	17.0	12.40	11.7	12.03
4 月 15 日	9.9	11.83	11.0	12.12	9.2	12.70	10.1	12.42	17.1	12.04
4 月 16 日	11.6	11.77	14.7	12.16	14.7	12.70	18.0	12.41	13.2	12.05
4 月 17 日	9.8	11.77	18.8	12.21	19.2	12.70	22.2	12.38	10.2	12.04
4 月 18 日	13.4	11.68	18.7	12.25	20.6	12.69	22.2	12.37	15.5	12.01
4 月 19 日	16.1	11.70	8.7	12.30	21.5	12.63	16.1	12.36	14.7	11.97
4 月 20 日	17.9	11.71	12.6	12.33	15.5	12.56	16.7	12.30	11.3	11.94
4 月 21 日	17.4	11.72	13.2	12.40	13.2	12.50	18.1	12.24	9.6	11.90
4 月 22 日	15.1	11.71	19.2	12.44	14.2	12.47	20.9	12.17	8.9	11.84
4 月 23 日	18.3	11.74	21.9	12.44	9.2	12.44	24.3	12.10	10.8	11.77
4 月 24 日	17.0	11.77	18.4	12.43	11.0	12.40	23.3	12.05	11.7	11.71
4 月 25 日	19.9	11.81	18.1	12.46	12.6	12.33	25.8	11.98	14.8	11.64
4 月 26 日	9.2	11.81	12.5	12.47	12.5	12.30	23.2	11.89	16.0	11.57
4 月 27 日	18.0	11.82	15.7	12.49	13.2	12.25	18.0	11.83	18.7	11.51
4 月 28 日	21.0	11.83	20.2	12.51	12.9	12.22	15.3	11.77	20.3	11.43
4 月 29 日	24.1	11.86	20.7	12.50	18.7	12.19	10.5	11.69	16.2	11.37
4 月 30 日	22.8	11.88	19.2	12.49	11.3	12.14	13.9	11.61	22.1	11.31
5 月 1 日	17.6	11.77	23.5	12.48	12.5	12.05	12.2	11.55	23.1	11.24
5 月 2 日	14.6	11.77	11.8	12.48	17.5	11.97	15.8	11.49	25.0	11.17
5 月 3 日	19.5	11.66	11.7	12.29	20.9	11.88	14.0	11.46	25.2	11.11
5 月 4 日	24.6	11.69	13.5	12.19	17.6	11.81	19.0	11.40	23.0	11.03
5 月 5 日	27.3	11.70	10.7	12.29	11.6	11.71	11.2	11.36	22.3	10.94

表 5 播种前 1—4 月中旬降雨量

Tab. 5 Rainfall from January to mid-April before sowing date

参数	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
播种前降雨量/mm	38.7	49.1	68.2	25.1	40.6

2.3 不同种植模式下土壤总含水量

玉米覆膜种植会降低土壤蒸发量,提高土壤水分生产力,增加土壤含水率,王罕博等^[28]利用土壤

水分传感器、微型蒸渗仪以及涡度相关系统检测出覆膜能提高土壤表层温度 4.9%,提高土壤体积含水率 19.5%,在全生育期玉米蒸散量降低 6.0%,土壤蒸发降低 57.5%,水分生产力提高 22.6%。针对定西市 4 种玉米种植模式,利用 AquaCrop 模型模拟分析确定出的 2016—2020 年最佳播种日期,模拟不同种植模式下土壤总含水量变化,模拟效果如图 3 所示。

整个生育期内土壤剖面总含水量随着降雨量的

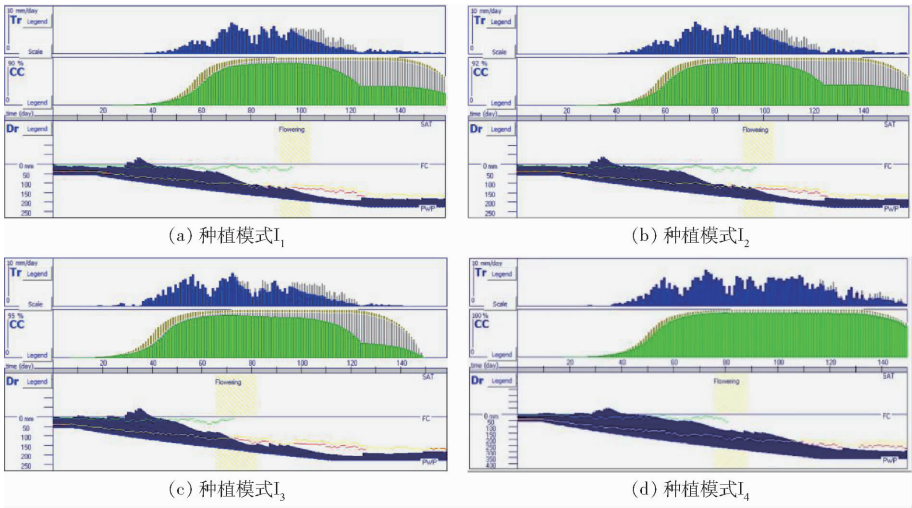


图 3 AquaCrop 模型模拟效果图

Fig. 3 Simulation results of AquaCrop model

变化曲线如图 4 所示,2016、2017 年生育期内降雨量小于 300 mm,属于干旱年,I₄土壤剖面总含水量比同时期其他 3 种模式高 90% 以上,2018—2020 年生育期内降雨量大于 300 mm,属于丰水年,I₄土壤含水量比同时期其他 3 种模式高 80% 以上,干旱年模式 I₄覆盖抑蒸作用比丰水年显著。干旱年,种植模式 I₃虽然地膜覆盖面积大,有抑制地表蒸发和

地表积温作用使玉米冠层覆盖度较大,但属于平作,并且地膜表面比裸地更光滑,地表径流比 I₁和 I₂大,雨水不能有效入渗,作物蒸腾量较大,所以出现模拟数据中在播种后 55 d 左右(抽雄期)I₃土壤含水量低于其他 3 种植植模式。丰水年,种植模式 I₃土壤总含水量略高于 I₁和 I₂,但整体保持持平。

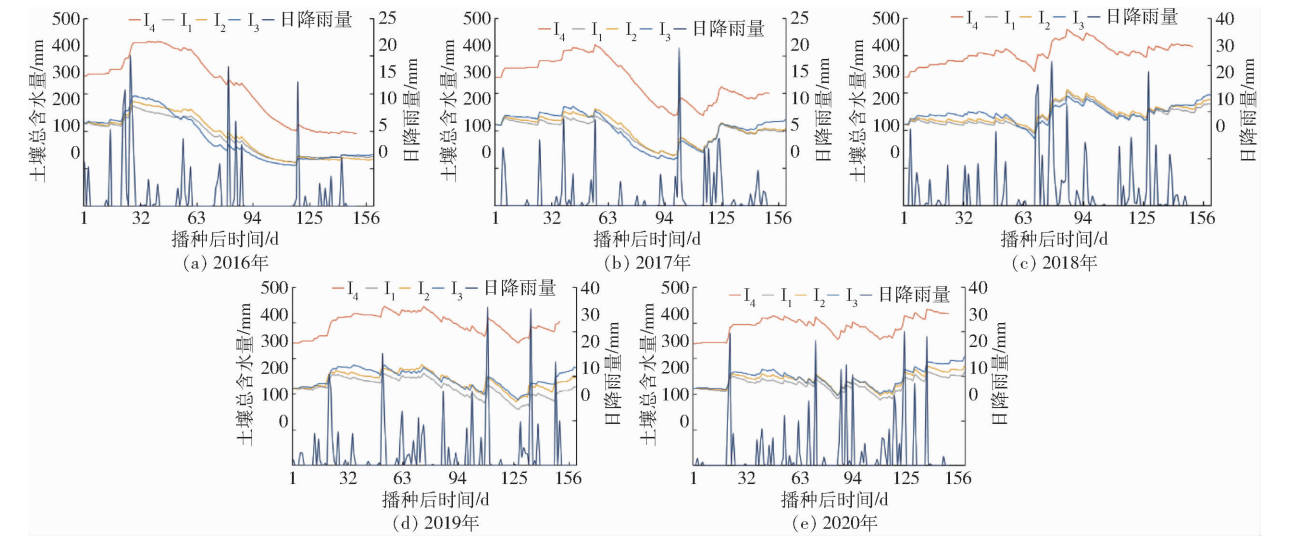


图 4 不同种植模式下土壤总含水量与降雨量关系

Fig. 4 Relationships between total soil water content and rainfall under different planting patterns

2.4 不同种植模式下地上生物量、产量、水分生产力

不同种植模式下土壤总含水量差异对地上生物量、产量和水分生产力有较大影响,模拟结果如表 6 所示,2016—2020 年 I₄地上生物量、产量、水分生产力均高于 I₁、I₂、I₃。干旱年地上生物量和产量增幅较大,水分生产力增幅较小,丰水年地上生物量和产量增幅较小,水分生产力增幅较大。

生产力增长量与降雨量之间的关系如图 5 所示,模式 I₄比模式 I₁、I₂、I₃地上生物量和产量随着生育期内降雨量的增加,增长量逐渐降低,而水分生产力随着生育期内降雨量的增加,增长量逐渐升高,由此,全膜双垄沟种植模式下土壤含水量相对其他 3 种模式较高,减小水分和温度对玉米各生长期的胁迫,增加玉米产量,并且在干旱年效果优于丰水年。

表 6 2016—2020 年不同种植模式下模拟结果						
Tab. 6 Simulation results under different planting patterns from 2016 to 2020						
参数	种植模式	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
地上生物量/(t·hm ⁻²)	I ₁	11.31	13.96	15.78	16.01	15.36
	I ₂	13.07	14.42	16.30	16.20	15.72
	I ₃	14.05	15.30	17.28	16.61	16.23
	I ₄	18.62	19.44	19.84	19.40	18.82
产量/(t·hm ⁻²)	I ₁	4.73	5.92	6.63	6.75	6.46
	I ₂	5.46	6.11	6.84	6.81	6.60
	I ₃	6.32	6.87	7.78	7.48	7.30
	I ₄	11.88	12.50	12.70	12.42	12.05
水分生产力/(kg·m ⁻³)	I ₁	1.58	1.72	1.73	1.63	1.77
	I ₂	1.79	1.80	1.84	1.77	1.90
	I ₃	1.78	1.90	1.90	1.82	1.98
	I ₄	3.32	3.47	3.92	3.69	3.96

在 2016、2017 年两个干旱年,4 种植植模式 I₄、I₃、I₂、I₁ 的地上生物量变异系数分别为 2.16%、4.25%、4.91%、10.49%;产量变异系数分别为 2.54%、4.25%、5.65%、11.25%。2018、2019、2020 年为丰水年,4 种植植模式 I₄、I₃、I₂、I₁ 的地上生物量变异系数分别为 2.16%、2.61%、3.58%、3.71%;产量的变异系数分别为 2.13%、2.61%、3.58%、3.81%。4 种植植模式下干旱年地上生物量、产量变异系数明显高于丰水年,并且模式 I₄下地上生物量、产量的变异系数均小于其他 3 种植植模式,模式 I₁的变异系数最大。是因为覆膜种植具有雨水分配调节和覆盖抑整作用,模式 I₄作用最为显著,并且干旱年 4 种模式的变异系数相对于丰水年变化差异较大^[29]。

2.5 种植模式 I₄下耗水量和深层土壤水分的关系

耗水量与生育期内降雨量和平均气温有着密切的关系,种植模式 I₄下,地膜覆盖率达到 100%,地

模式 I₄比模式 I₁、I₂、I₃地上生物量、产量、水分

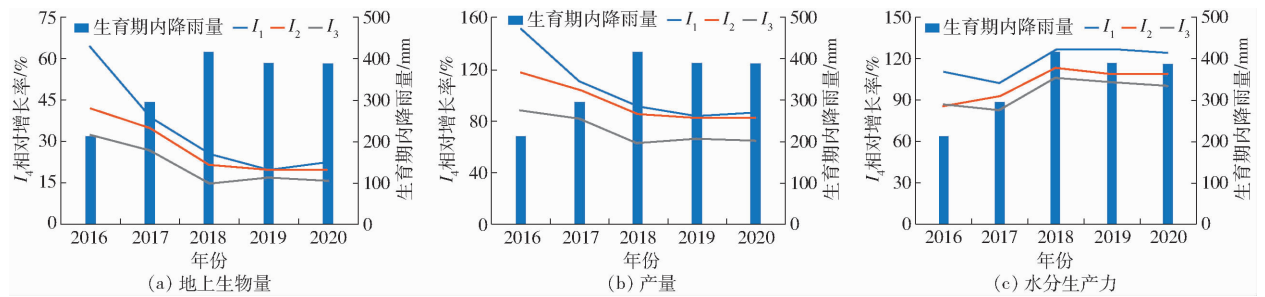


图5 2016—2020 年 I_4 模式比 I_1 、 I_2 、 I_3 相对增长量与降雨量关系

Fig.5 Relationships between relative increase of I_4 model ratio I_1 , I_2 , I_3 and rainfall from 2016 to 2020

表蒸发基本为 0,只考虑作物蒸腾,所以耗水量为作物蒸腾。由于是垄作,所以没有地表径流,雨水全部入渗。经模拟分析,如表 7 所示,2016—2020 年模式 I_4 玉米最大冠层覆盖度均大于 90%,玉米长势较好,降雨量对耗水量影响较小;耗水量随生育期内平均气温下降也呈下降趋势。模式 I_4 增加玉米冠层覆盖度,提高作物蒸腾量,干旱地区降雨量少,很可能会过度透支土壤水分导致土壤深层出现干燥层。经模拟研究分析,5 年平均耗水量为 336.58 mm,2000—2020 年年有效降雨量如图 6 所示,2000 年耗水量与降雨量基本持平,2001、2002、2004、2009、2011、2015、2016 年耗水量高于降雨量,作物生长透支土壤水分,其余 12 年耗水量均低于降雨量,因此,不可能出现过度透支土壤水分,出现深层土壤干燥层。

表 7 2016—2020 年耗水量变化关系					
Tab.7 Changes of water consumption from 2016 to 2020					
参数	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
耗水量/mm	357.5	360.8	323.7	336.5	304.4
生育期平均气温/℃	19.1	18.4	17.3	16.6	16.1

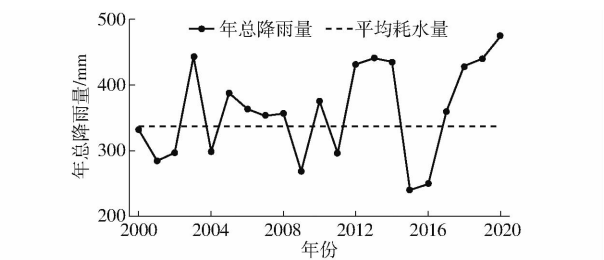


图6 年总降雨量与平均耗水量的关系
Fig.6 Relationship between annual total rainfall and average water consumption

3 讨论

玉米全膜双垄沟播种植模式下 AquaCrop 模型

模拟结果略大于大田试验结果,在模型田间管理数据中,覆膜播种后有渗水孔和播种孔,地膜覆盖率低于 100%,存在部分的地表蒸发,但破损地膜面积很小可以忽略,因此模型中覆膜率设置为 100%。地膜覆盖不能完全抑制田间杂草生长,缺乏杂草侵扰数据,影响模拟结果。全膜双垄沟播技术在模型中设置为垄作,地表径流为 0,但在试验中由于地块和地形的影响,会有一定的地表径流,导致雨水入渗不均匀,影响玉米产量。在后续研究中,应更加完善数据收集整理,使模拟数据更加贴合试验数据,提高模型的适用性。

4 结论

(1)采用以水为驱动力的 AquaCrop 模型对定西市 2016—2020 年玉米全膜双垄沟播技术模拟研究,验证 AquaCrop 模型的适用性, r 均高于 0.89, RMSE 分布在 0.01 ~ 0.24, CV (RMSE) 分布在 1.66% ~ 2.10%, EF 均高于 0.90, d 均高于 0.90。并确定玉米播种时间,研究 4 种植模式 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 下土壤总含水量、地上生物量、产量和水分生产率,以及耗水量和降雨量的关系。

(2)应用 AquaCrop 模型数值模拟结果表明,定西市玉米播种时间对产量有较为显著的影响,过早或过迟播种产量都会明显降低,最佳播种时间为平均气温稳定在 15℃ 左右时(4 月 15—25 日)产量最高。在干旱年和丰水年,模式 I_4 土壤剖面含水量、产量、地上生物量、水分生产率明显高于模式 I_1 、 I_2 、 I_3 ,并且干旱年模式 I_4 与模式 I_1 、 I_2 、 I_3 的地上生物量和产量变异系数的差异大于丰水年,干旱年模式 I_4 作用更加显著;2016—2020 年平均耗水量为 336.58 mm,年平均气温越高耗水量越大,2000—2020 年总降雨量大于总耗水量,种植模式 I_4 不会过度透支土壤水分,深层土壤不会出现干燥层。

参 考 文 献

[1] 刘海启,王迎春. 我国西北旱区农牧业综合开发潜力分析及水资源支撑能力研究[J]. 中国农业资源区划, 2015, 36 (3):1-9.

- LIU Haiqi, WANG Yingchun. The comprehensively analysis of development potenyal in husbandry and supporting capacity of water resources in northwest of China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(3):1 – 9. (in Chinese)
- [2] 韩宇平, 王朋, 王富强. 气候变化下淮河区主要作物需水量变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5):114 – 117. HAN Yuping, WANG Peng, WANG Fuqiang. Variation characteristics on water requirement of main crops in Huaihe river with climatic changes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(5):114 – 117. (in Chinese)
- [3] 孙哲, 栗晓玲. 基于 AquaCrop 的县域资源节水潜力研究——以高台县为例[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(10):145 – 154. SUN Zhe, SU Xiaoling. Resource-based water-saving potential based on AquaCrop:a case study in Gaotai county[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2021, 49(10):145 – 154. (in Chinese)
- [4] 蒋傲男, 闫静琦, 陈宗政, 等. 不同覆膜方式对旱作区春玉米农田土壤水分及产量的影响[J]. 东北农业科学, 2022, 47(3):26 – 30, 36. JIANG Aonan, YAN Jingqi, CHEN Zongzheng, et al. Effects of different plastic film mulching methods on soil moisture and yield of spring maize in arid farming area[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(3):26 – 30, 36. (in Chinese)
- [5] 李玉玲, 张鹏, 张艳, 等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6):1084 – 1096. LI Yuling, ZHANG Peng, ZHANG Yan, et al. Effects of rainfall harvesting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature, and yield of spring maize(*Zea mays* L.) in semi-arid areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6):1084 – 1096. (in Chinese)
- [6] 王金峰, 王金武, 鞠金艳, 等. 深施型液态施肥机扎穴机构研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5):157 – 160. WANG Jinfeng, WANG Jinwu, JU Jinyan, et al. Research progress on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5):157 – 160. (in Chinese)
- [7] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):1 – 16. DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):1 – 16. (in Chinese)
- [8] 王久鑫, 赵武云, 刘小龙, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1):119 – 128. WANG Jiuxin, ZHAO Wuyun, LIU Xiaolong, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):119 – 128. (in Chinese)
- [9] 戴飞, 张仕林, 宋学锋, 等. 全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5):108 – 117. DAI Fei, ZHANG Shilin, SONG Xuefeng, et al. Design and test of combined operation machine for double width filming and covering soil on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):108 – 117. (in Chinese)
- [10] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1):20 – 30. ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):20 – 30. (in Chinese)
- [11] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2):49 – 56, 77. DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):49 – 56, 77. (in Chinese)
- [12] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机横向土带堆放机构的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5):140 – 149. SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of transverse soil-belt stacking mechanism for full-film double-furrow ridge mulching laminating machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5):140 – 149. (in Chinese)
- [13] 杨楠. 不同耕作措施下旱地小麦产量形成过程对光温的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020. YANG Nan. Responses of dryland wheat yield formation process to light and temperature under different tillage measures[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [14] 魏帅. 基于 DSSAT 模型的冬小麦水肥耦合模拟研究[D]. 济南: 济南大学, 2021. WEI Shuai. Simulation study on water and fertilizer coupling of winter wheat based on DSSAT model[D]. Ji'nan: University of Jinan, 2021. (in Chinese)
- [15] 戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪, 等. 河套灌区不同水肥处理对玉米生长影响的 AquaCrop 模型模拟[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):312 – 319. DAI Jialu, LI Ruiping, LI Congcong, et al. Simulation of effects of different water and fertilizer treatments on maize growth

- with AquaCrop in Hetao irrigated area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):312–319. (in Chinese)
- [16] SAAB M, TODOROVIC M, ALBRIZIO R. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147:21–33.
- [17] 李祯. 河套灌区春玉米—土壤系统对不同水氮运筹模式的响应及 DSSAT—CERES—Maize 模型的适用性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- LI Zhen. The response of spring maize-soil system to different water-nitrogen management regimes and applicability research of DSSAT—CERES—Maize model in Hetao irrigation district[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017. (in Chinese)
- [18] 朱秀芳, 李宜展, 潘耀忠, 等. AquaCrop 作物模型研究和应用进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(8): 270–278.
- ZHU Xiufang, LI Yizhan, PAN Yaozhong, et al. A review on the research and application of AquaCrop model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(8): 270–278. (in Chinese)
- [19] 朱成立, 徐雨琳, 黄明逸, 等. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦咸淡轮灌制度模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4):330–342.
- ZHU Chengli, XU Yulin, HUANG Mingyi, et al. Simulation and evaluation of cycle irrigation with brackish and fresh water for winter wheat based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 330–342. (in Chinese)
- [20] 王兴鹏, 蒋富昌, 王洪博, 等. 基于 AquaCrop 模型的南疆无膜滴灌棉花灌溉制度优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4):293–301, 335.
- WANG Xingpeng, JIANG Fuchang, WANG Hongbo, et al. Irrigation scheduling optimization of drip-irrigated without plastic film cotton in south Xinjiang based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):293–301, 335. (in Chinese)
- [21] 董文俊, 刘健峰, 丁奠元, 等. 旱作覆膜玉米生长和水分利用对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1):1–12, 21.
- DONG Wenjun, LIU Jianfeng, DING Dianyuan, et al. Response of maize growth and water utilization under plastic mulching in dryland to climate change[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1):1–12, 21. (in Chinese)
- [22] 徐昆, 朱秀芳, 刘莹, 等. 采用 AquaCrop 作物生长模型研究中国玉米干旱脆弱性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 154–161.
- XU Kun, ZHU Xiufang, LIU Ying, et al. Vulnerability of drought disaster of maize in China based on AquaCrop model[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):154–161. (in Chinese)
- [23] 刘匡, 丁奠元, 张浩杰, 等. 覆膜条件下对 AquaCrop 模型冬小麦生长动态和土壤水分模拟效果的评价分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(10):1841–1854.
- LIU Xia, DING Dianyuan, ZHANG Haojie, et al. Evaluation analysis of AquaCrop model in modeling winter wheat growing development and soil moisture under plastic mulching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(10):1841–1854. (in Chinese)
- [24] 王小林. 密度和有机肥提高覆膜春玉米水分利用效率的生理基础[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- WANG Xiaolin. Physiological basis of planting density and organic manure increase water use efficiency of film mulched spring maize[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [25] 张涛, 孙伟, 张锋伟, 等. 旱地全膜双垄沟玉米生产的 AquaCrop 模型模拟及管理措施优化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3):918–926.
- ZHANG Tao, SUN Wei, ZHANG Fengwei, et al. Simulation of AquaCrop model and management practice optimization for dryland maize production under whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3):918–926. (in Chinese)
- [26] 丁奠元, 徐志鹏, 陈飞宇, 等. 基于覆膜积温补偿效应的 AquaCrop 模型优化模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6):113–125.
- DING Dianyuan, XU Zhipeng, CHEN Feiyu, et al. Optimization simulation of AquaCrop based on the compensatory effect under plastic mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6):113–125. (in Chinese)
- [27] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6):1247–1253.
- MA Guosheng, XU Jiquan, LU Haidong, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L) in central Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6):1247–1253. (in Chinese)
- [28] 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):88–94.
- WANG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and unmulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22):88–94. (in Chinese)
- [29] ZHANG Feng, ZHANG Wenjuan, QI Jiaguo, et al. A regional evaluation of plastic film mulching for improving crop yields on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248:458–468.