

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

常梅, 周青云*, 尹林萍
(天津农学院, 天津 300392)

摘要:【目的】探明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。【方法】设置4个试验处理: 常规滴灌 10 mm (N1)、常规滴灌 20 mm (N2)、膜下滴灌 10 mm (M1) 和膜下滴灌 20 mm (M2), 研究不同灌溉方式和灌水定额对夏玉米生长的影响, 并基于 2 a 的试验数据对 AquaCrop 模型进行率定、验证, 利用率定、验证后的模型预测平水年不同灌溉方案下的夏玉米产量, 以产量最大为目标筛选最优的灌溉方案。【结果】N2 处理下的 0~40 cm 土层土壤含水率 (SWC) 均高于 N1 处理和 M2 处理; 各处理的生物量平均值和产量表现为: M2 处理>M1 处理>N2 处理>N1 处理。各处理 SWC 模拟值与实测值的 R^2 、EF 和 RMSE 分别为 0.645~0.907、0.461~0.779 和 0.021~0.034, 冠层覆盖度模拟值与实测值的 R^2 、EF 和 RMSE 分别为 0.942~0.992、0.964~0.990 和 0.463~0.781, 生物量模拟值与实测值的 R^2 、EF 和 RMSE 分别为 0.959~0.984、0.969~0.986 和 0.507~0.614 t/hm², 产量模拟值与实测值的 RMSE 为 0.180~0.890 t/hm², 水分利用效率模拟值与实测值的 RMSE 为 0.001~0.003 t/(hm²·mm)。【结论】常规滴灌下高水相比低水处理可提高 0~40 cm 土层 SWC, 灌水 20 mm 条件下, 常规滴灌处理在 0~40 cm 土层的 SWC 高于膜下滴灌处理; 覆膜与提高灌水量均能提高夏玉米的生物量和产量, AquaCrop 模型能较好地模拟天津市夏玉米的生长过程; 夏玉米最优灌溉方案为苗期灌溉 20 mm、抽穗期和灌浆期各灌溉 10 mm。

关键词: AquaCrop 模型; 夏玉米; 土壤含水率; 冠层覆盖度; 生物量和产量; WUE

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022363

OSID:



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 Mei, ZHOU Qingyun, YIN Linping. 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.

0 引言

【研究意义】玉米是我国第一大粮食作物, 2021 年全国玉米产量达 2 725.5 亿 kg^[1], 占全国粮食总产量的 40%, 玉米的高产、稳产是我国粮食安全的重要保障。天津市地处华北平原, 主要种植玉米和小麦, 属温带季风气候区, 降水总量少且时空分布不均等因素导致天津市水资源短缺, 同时地下水超采严重及不合理灌溉等因素加剧了水资源危机^[2]。水是玉米生产的关键要素, 水资源不足严重限制了玉米生产, 对天津市玉米稳产构成了严峻挑战。膜下滴灌是目前应用较广的节水灌溉技术, 具有小流量、高频率等特点, 能起到节水保墒、增温、抑盐、提高水分利用效率和产量等作用^[3], 被广泛应用于

干旱缺水地区, 对天津市夏玉米稳产具有重要意义。

【研究进展】传统的田间试验时空局限性较大, 因此结合作物模型对作物生长过程的多角度模拟研究已成为国内外热点方向^[4]。作物模型有利于田间管理和作物产量的预测, 使农业向精准化方向发展; AquaCrop 模型因输入参数少、操作简便和模拟结果准确等优点受到广泛关注^[5]。该模型属于水驱动模型, 可以模拟不同灌溉制度^[6]、灌溉方式^[7]、作物类型和覆盖方式^[8-10]下的土壤水分动态、作物生长发育、产量及水分利用效率等指标。国内外学者利用 AquaCrop 模型对不同地区玉米进行了模拟并开展适应性评价。赵引等^[11]利用该模型对西北旱区玉米的产量和水分利用效率进行了模拟, 结果表明 AquaCrop 模型对西北旱区玉米产量和水分利用效率的模拟效果较好; 董文俊等^[12]用该模型对关中地区的夏玉米生长动态、水分利用效率及产量进行了模拟, 指出该模型能较好地模拟关中地区的夏玉米生长、水分利用效率和产量。Diaafliah 等^[13]利用该模

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51609170); 天津市研究生科研创新项目 (2021YJSS135)

作者简介: 常梅 (1995-), 女。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: 2086137146@qq.com

通信作者: 周青云 (1980-), 女。教授, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: zhouqyand@126.com

型对伊拉克不同灌溉和培育方式下的玉米冠层覆盖度、生物量、收获指数及水分利用效率进行了模拟, 结果表明各指标模拟效果较好, AquaCrop 模型能有效地对该地区的灌溉管理作出决策。以上研究均表明 AquaCrop 模型能对不同地区的玉米生长实现较好的模拟。【切入点】然而, 关于 AquaCrop 模型对天津市不同灌溉方式和灌水定额下的夏玉米生长模拟的研究仍未见报道。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以天津市夏玉米为研究对象, 分析不同灌溉方式和灌水定额对夏玉米根际土壤含水率、生物量及产量的影响, 用 2019 年和 2020 年的试验数据对 AquaCrop 模型进行校准和验证, 以评价该模型在天津的适应性, 并利用 AquaCrop 模型预测不同灌溉方案下的夏玉米产量, 以产量最大为目标筛选出最优灌溉方案, 为天津市夏玉米产量提升和灌溉决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验在天津市静海区团泊洼镇试验区进行, 该区地理坐标为 116°42′—117°12′30″ E 和 38°35′—39°4′45″ N, 位于海河流域下游, 平均海拔为 5 m, 地下水位埋深为 1.5 m, 土壤类型为潮土, 气候类型为暖温带大陆性季风气候, 年平均日照时间为 2 699 h, 年平均气温为 9~20 °C, 年平均降水量为 566.7 mm, 年平均蒸发量为 1 800 mm。

1.2 试验设计

供试玉米品种为天塔 619, 共进行 2 a 试验, 2019 年于 6 月 15 日播种, 9 月底收获, 2020 年于 6 月 20 日播种, 10 月初收获, 种植密度为 8.3 万株/hm²。灌溉方式为膜下滴灌和常规滴灌, 滴灌带间距为 60 cm, 滴头间距为 30 cm, 滴头流量为 1.38 L/h, 地膜覆盖设置为 1 膜 2 行半覆膜。试验设置 4 个处理, 分别为: 常规滴灌 10 mm (N1)、常规滴灌 20 mm (N2)、膜下滴灌 10 mm (M1) 和膜下滴灌 20 mm (M2), 每个处理设置 3 个重复, 分别在苗期、拔节期和抽穗期进行控制灌溉, 具体试验设计见表 1。各处理均使用 46% 尿素、16% 过磷酸钙和 50% 硫酸钾作为氮、磷和钾肥, 氮、磷、钾肥的净施用量分别为 168、84、60 kg/hm², 首次灌溉时通过水肥融合进行常规施肥, 后期无追肥; 各处理的杂草管理和病虫害防治管理措施一致。

1.3 观测指标及方法

1.3.1 土壤含水率

利用 PR2 管测定夏玉米根际 0~60 cm 土层的土壤含水率 (SWC), 于试验前将 PR2 管埋设在土壤中,

分别在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期测定 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 SWC, 并利用烘干法对实测 SWC 进行校准。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	灌水定额/mm			灌溉定额/mm
	苗期	拔节期	抽穗期	
N1	10	10	10	30
N2	20	20	20	60
M1	10	10	10	30
M2	20	20	20	60

1.3.2 冠层覆盖度

量取 3 株代表性植株所有叶片的最大长度和宽度, 采用乘积法计算单株平均有效叶面积, 结合种植密度 (ρ) 和折算系数 (0.75) 得到叶面积指数 (LAI), 见式 (1), 通过式 (2) 可将 LAI 转化为冠层覆盖度 (CC):

$$LAI = \frac{0.75\rho \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} \cdot W_{ij})}{m}, \quad (1)$$

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2}, \quad (2)$$

式中: L_{ij} 和 W_{ij} 分别为叶片最大长度和宽度 (cm); n 为每株玉米的叶片数 (片/株); m 为测定玉米株数 (株)。

1.3.3 生物量和产量

在夏玉米生育期内选取 3 株长势均匀的植株, 剪去地下部分, 获得完整冠部, 于 105 °C 烘箱中杀青 0.5 h 后用 80 °C 恒温烘干至恒质量, 测定其干物质量, 乘以种植密度得到生物量。夏玉米成熟后, 每个处理选取 1 m² 代表作物整体长势的植株, 果穗风干后经人工脱粒, 于 80 °C 恒温烘干至恒质量后测算产量。

1.3.4 水分利用效率

水分利用效率 (WUE) 通过单位耗水量下的产量来计算, 耗水量利用水量平衡法计算, 由于本试验为滴灌, 因此不考虑深层渗漏量, 无地表径流量, 作物截留量忽略不计, 具体计算方法为:

$$WUE = \frac{Y}{ET_c}, \quad (3)$$

$$ET_c = P + I + \Delta S, \quad (4)$$

式中: Y 为籽粒产量 (t/hm²); ET_c 为作物耗水量 (mm); P 为生育期内总降水量 (mm); I 为灌溉定额 (mm); ΔS 为平衡土层内最终储水量与初始储水量之差 (mm)。

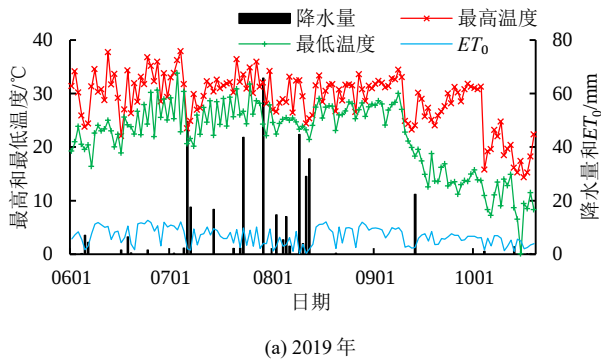
1.3.5 最大有效根深

采用土壤剖面挖根法, 以夏玉米茎为剖面中心,

长和宽均为 1/2 株距,挖取最大有效根系,人工测量其长度。

1.4 AquaCrop 模型数据库的构建

AquaCrop 模型的输入数据主要包括气象、土壤、作物和田间管理数据。



1.4.1 气象数据

气象数据来源于试验基地自动观测气象站,主要包括气温、降水量等数据, ET_0 采用 Penman-Montieth 公式计算^[14]。图 1 为 2019 年和 2020 年天津市夏玉米生育期的气象数据,按模型标准导入数据并建立气象数据库。

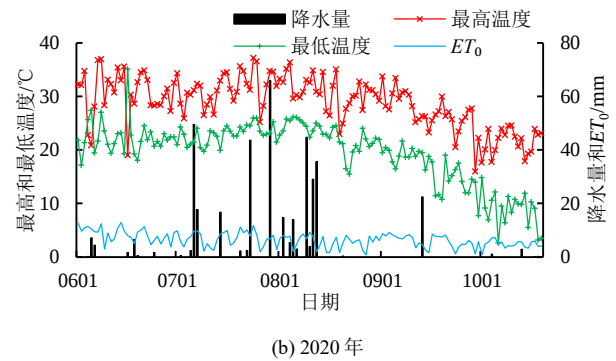


图 1 2019 年和 2020 年夏玉米生育期气象变化

Fig.1 Meteorological changes of summer maize growth period from 2019 and 2020

1.4.2 土壤数据

土壤数据包括土层厚度、体积质量、永久凋萎系数、田间持水率和饱和含水率等,各水力参数使用环刀法取样,利用压力膜仪测得。试验地土壤水力参数见表 2。在 AquaCrop 模型中输入各土层的土壤水力参数,按模型标准建立土壤数据库。

表 2 试验地土壤水力参数

Table 2 Parameters of soil hydraulic characteristics in the test site

土层厚度/cm	体积质量/ (g cm^{-3})	永久凋萎系数/ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	田间持水率/ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
0~20	1.182	0.058	0.250	0.517
20~40	1.427	0.118	0.300	0.442
40~60	1.214	0.036	0.241	0.465
60~80	1.212	0.012	0.238	0.483
80~100	1.645	0.076	0.329	0.340

1.4.3 作物数据

作物种植方式、密度、初始冠层覆盖度和最大冠层覆盖度通过田间试验获得,基底温度、上限温度采用模型默认值,归一化水分生产力、参考收获指数、水分胁迫系数及形状因子参考模型手册的取值范围采用“试错法”校准。参照 Vanuytrecht 的模型参数校准顺序,按先后顺序校准冠层覆盖度、生物量和产量。用 2019 年试验数据对模型参数进行校准。校准后参数见表 3。

1.4.4 田间管理数据

田间管理数据包括土壤肥力、覆膜情况、田间地表措施和杂草管理,设置无土壤肥力胁迫,未采取田间地表措施,杂草管理良好,按覆膜和不覆膜 2 种情况分别设置 2 个田间管理文件。

表 3 AquaCrop 模型校准参数

Table 3 Partial calibration parameters of AquaCrop model

模型参数	取值	单位
初始冠层覆盖度 CC_0	0.41	%
最大冠层覆盖度 CC_x	89~92	%
最大根深 Z_x	1	m
参考收获指数 HI_0	48	%
基底温度 T_{base}	8.0	°C
上限温度 T_{upper}	30.0	°C
冠层增长系数 CGC	0.012~0.013	—
冠层衰减系数 CDC	0.010	—
作物冠层完整未衰老时的作物系数 Kcb_x	1.03	—
ET_0 和 CO_2 为标准规范化的水分生产率 WP^*	33.7(2 000)	g/m^2
水分胁迫对冠层生长影响上限 $P_{expupper}$	0.14	—
水分胁迫对冠层生长影响下限 $P_{explower}$	0.72	—

1.5 模型评价指标

选取决定系数 (R^2)、模型性能指数 (EF) 和均方根误差 ($RMSE$) 对模型精度进行评价^[15], R^2 和 EF 越趋于 1, $RMSE$ 越接近 0, 模型精度越高。

1.6 不同灌溉方案下的产量预测

对天津市 1954—2019 年的降水进行频率分析,可知降水频率为 25%、50%、75%和 95%对应的降水量分别为 646.8、537、456.2 mm 和 332.7 mm,多年平均降水量为 550.56 mm,变差系数 (C_v) 为 0.27,偏态系数 (C_s) 为 0.65;由于平水年在多个降水年型中具有典型性,通过对比 1954—2019 年降水数据确定 2015 年为平水年,根据 2015 年的气象数据(图 2)、夏玉米生长规律和天津市灌溉标准,在夏玉米生育期设置 6 个灌溉方案,2 种灌水定额,具体灌溉方案见表 4;利用参数化模型预测不同灌

溉方案下的产量，以最大产量为目标筛选出最优灌溉方案。

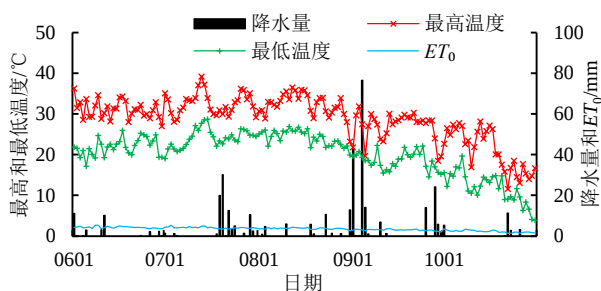


图 2 2015 年的气象数据

Fig.2 Meteorological data in 2015

表 4 灌溉方案设计

Table 4 Irrigation scheme design

灌溉方案	灌水定额/mm		灌溉定额/mm	
	苗期	抽穗期	苗期	抽穗期/mm
C ₁	20	—	—	20
C ₂	—	10	—	10
C ₃	—	—	10	10
C ₄	20	10	—	30
C ₅	20	—	10	30
C ₆	20	10	10	40

1.7 数据处理

利用 Excel 2019 进行数据处理和图表绘制；利用 IBM SPSS Statistics 22 进行显著性分析。

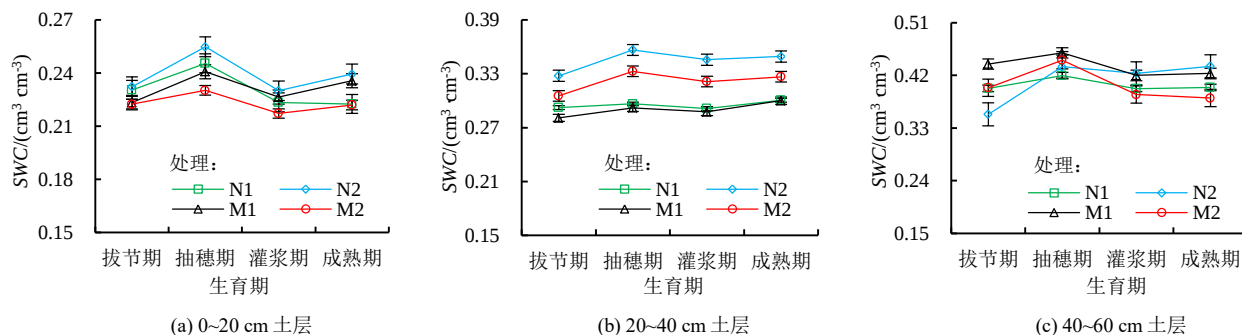


图 3 不同处理下各土层土壤含水率变化

Fig.3 Changes of soil water content in different soil layers under different conditions

2.2 不同处理对夏玉米生物量及产量的影响

2.2.1 不同处理对夏玉米生物量的影响

图 4 为不同处理夏玉米生物量的变化情况。苗期 M2 处理的生物量高于 N2 处理；拔节期各处理生物量表现为：M2 处理>M1 处理>N2 处理>N1 处理；抽穗期 M1 处理和 M2 处理的生物量高于 N1 处理，N2 处理最高；灌浆期 M1 处理的生物量低于 M2 处理，覆膜滴灌处理的生物量高于常规滴灌处理；成熟期覆膜滴灌处理的生物量高于常规滴灌处理；在全生育期，不同处理下的夏玉米生物量平均值表现为：M2 处理>M1 处理>N2 处理>N1 处理，表明膜下滴灌和高水处理更利于生物量积累。

2 结果与分析

2.1 不同处理对夏玉米根际土壤 SWC 的影响

图 3 为不同处理下各土层土壤 SWC 的变化情况，各处理在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层 SWC 的变化范围分别为：0.217~0.255、0.281~0.357 cm³/cm³ 和 0.353~0.459 cm³/cm³，可见 SWC 随土层深度的增加呈上升趋势。在 0~20 cm 土层，全生育期 N2 处理下的 SWC 高于 N1 处理和 M2 处理；M1 处理下的 SWC 高于 M2 处理。在 20~40 cm 土层，各处理下的 SWC 在全生育期表现为：N2 处理>M2 处理>N1 处理>M1 处理。对于 40~60 cm 土层，拔节期常规滴灌处理下的 SWC 低于覆膜滴灌处理，抽穗—灌浆期覆膜滴灌处理的 SWC 降幅高于常规滴灌处理，灌浆—成熟期各处理的 SWC 趋于稳定；N1 处理和 M1 处理在灌浆期的 SWC 高于 N2 处理和 M2 处理，抽穗期后 M1 处理的 SWC 仍高于 M2 处理，而 N1 处理的 SWC 低于 N2 处理。由上述分析可知，常规滴灌下高水处理能提高 0~40 cm 土层 SWC，膜下滴灌高水处理能提高 20~40 cm 土层 SWC，其他土层的土壤含水率变化差异不显著；受降水影响，20 mm 灌水定额下的常规滴灌处理在 0~40 cm 土层的 SWC 高于覆膜滴灌处理。

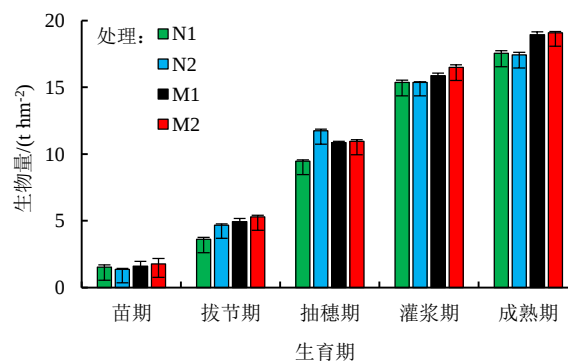


图 4 不同处理夏玉米生物量变化

Fig.4 Changes of summer maize biomass under different conditions

2.2.2 不同处理对夏玉米产量的影响

表 5 为不同处理下的夏玉米产量及构成要素。灌水 10 mm 时覆膜滴灌处理较常规滴灌处理的穗长和穗粒数增加了 10.14%和 23.81%，灌水 20 mm 时覆膜滴灌处理较常规滴灌处理的穗长和穗粒数增加了 6.17%和 4.49%；常规滴灌下高水处理较低水处理的穗长和穗粒数增加了 17.39%和 21.77%，膜下滴灌下高水处理较低水处理的穗长和穗粒数增加了 13.16%和 2.77%。常规滴灌下高水处理较低水处理的穗粗增加了 36.59%，膜下滴灌下高水处理较低水处理的穗粗增加了 8.70%。常规滴灌下高水处理较低

水处理突尖长降低了 73.08%，膜下滴灌下高水处理较低水处理突尖长降低了 66.67%。灌水 10 mm 时覆膜滴灌处理较常规滴灌处理的百粒质量和产量提高了 3.82%和 11.66%；灌水 20 mm 时覆膜滴灌处理较常规滴灌处理的百粒质量和产量分别提高了 2.82%和 7.40%；常规滴灌下高水处理较低水处理的产量提高了 11.43%，膜下滴灌下高水处理较低水处理的产量提高了 7.17%。高水处理能提高夏玉米穗长、穗粗、穗粒数、百粒质量和产量，同时降低夏玉米突尖长，膜下滴灌能提高夏玉米穗长、穗粒数、百粒质量和产量。

表 5 不同处理下的夏玉米产量及构成要素

Table 5 Yield and index of summer maize under different irrigation conditions

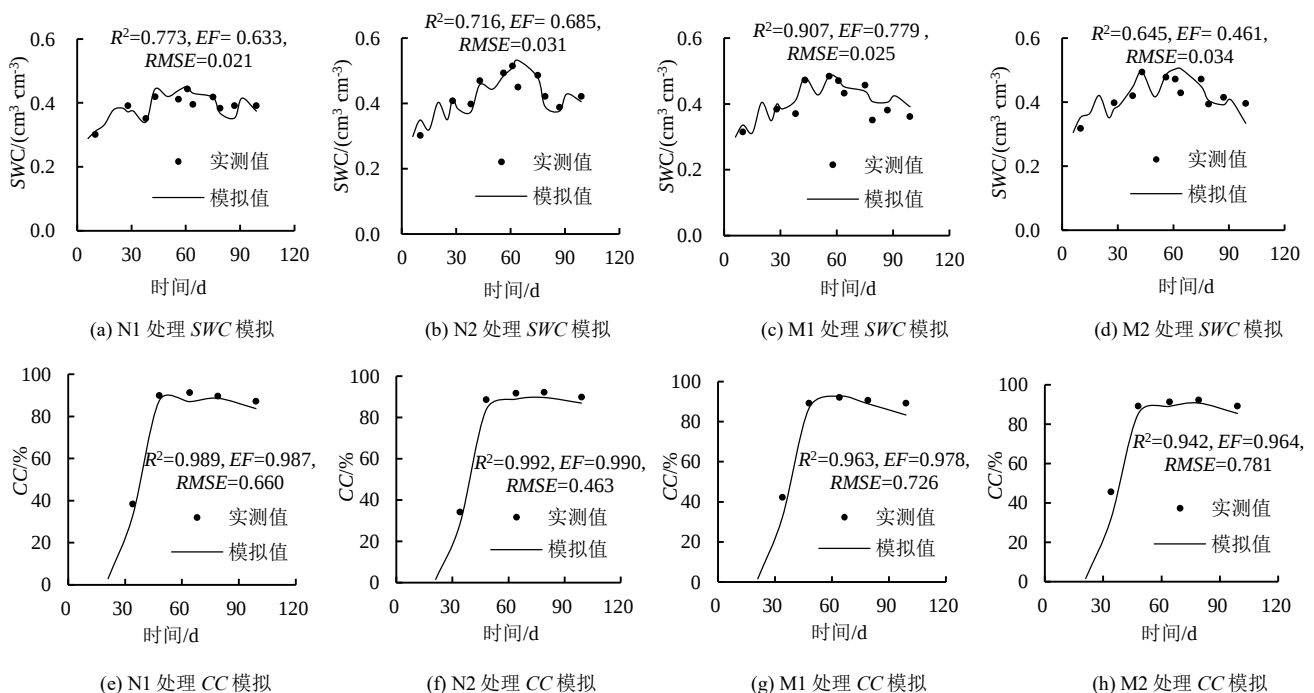
处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗粒数/(粒穗 ⁻¹)	突尖长/cm	百粒质量/g	产量/(t hm ⁻²)
N1	13.80c	4.10c	362.00c	2.60a	42.78b	8.49c
N2	16.20ab	5.60a	440.80b	0.70c	43.27ab	9.46b
M1	15.20b	4.60bc	448.20b	2.40a	44.41a	9.48b
M2	17.20a	5.00b	460.60a	0.80bc	44.49a	10.16a

注 不同处理的小写字母表示在 $P<0.05$ 水平下具有显著差异。

2.3 模型验证

不同处理夏玉米根际 0~60 cm 土层 SWC、CC 和生物量的模拟验证结果见图 5。产量及 WUE 的模拟验证结果及误差统计见表 6。各处理 SWC 模拟值与实测值的 R^2 为 0.645~0.907， EF 为 0.461~0.779， $RMSE$ 为 0.021~0.034；各处理 CC 模拟值与实测值的 R^2 为 0.942~0.992， EF 为 0.964~0.990， $RMSE$ 为 0.463~0.781；各处理生物量模拟值与实测值的 R^2 、

EF 和 $RMSE$ 分别为 0.959~0.984、0.969~0.986、0.507~0.614 t/hm²。各处理产量模拟值与实测值的 $RMSE$ 为 0.180~0.890 t/hm²；各处理 WUE 模拟值与实测值的 $RMSE$ 为 0.001~0.003 t/(hm² mm)；WUE 的模拟值表现为：N2 处理<N1 处理<M2 处理<M1 处理，说明膜下滴灌和低水处理能提高夏玉米水分生产效率。各模拟评价指标误差均在模型允许范围内，说明模型能对天津市夏玉米进行较好的模拟。



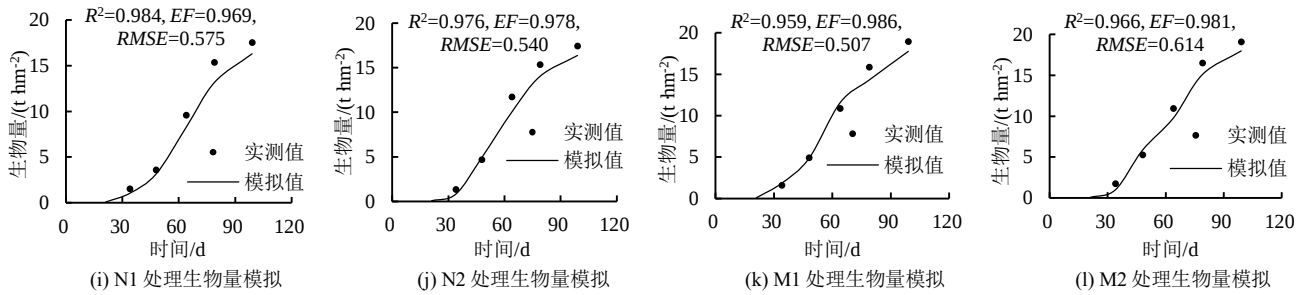
图 5 不同处理下夏玉米根际 0~60 cm 土层 *SWC*、*CC* 和生物量的模拟验证结果Fig.5 Simulation of *SWC* of 0~60 cm soil layer in rhizosphere, *CC* and biomass of summer maize under different treatments

表 6 不同处理下产量和水分利用效率

模拟结果及模拟误差统计

Table 6 Simulation results and error statistics of yield and water use efficiency under different conditions

处理	产量/(t hm ⁻²)			WUE/(t hm ⁻² mm ⁻¹)		
	模拟值	实测值	RMSE	模拟值	实测值	RMSE
N1	9.104	8.49	0.614	0.030	0.028	0.002
N2	9.640	9.46	0.180	0.029	0.028	0.001
M1	10.370	9.48	0.890	0.034	0.031	0.003
M2	10.857	10.16	0.697	0.032	0.030	0.002

2.4 不同灌溉方案下的产量预测结果

表 7 为不同灌溉方案下的预测产量，各方案下的产量表现为：C₆ 方案>C₄ 方案>C₅ 方案>C₁ 方案>C₂ 方案>C₃ 方案，说明产量随灌溉定额的上升而增加；C₂、C₄ 方案下的产量高于 C₃ 方案和 C₅ 方案，表明相同灌溉定额在抽穗期灌水较灌浆期更能提高作物产量；C₆ 方案下的产量最高，即最优灌溉方案为苗期灌溉 20 mm，抽穗期和灌浆期各灌溉 10 mm。

表 7 不同灌溉方案下的预测产量

Table 7 Yield forecast under different irrigation scheme

灌溉方案	灌溉定额/mm	产量/(t hm ⁻²)
C ₁	20	8.799
C ₂	10	8.543
C ₃	10	8.488
C ₄	30	9.136
C ₅	30	9.056
C ₆	40	9.253

3 讨论

本研究中，常规滴灌下高水较低水处理能提高 *SWC*，膜下滴灌和高水处理均能提高夏玉米生物量和产量；而膜下滴灌较常规滴灌处理对 *SWC* 的影响不显著，是由于降水可为常规滴灌补充土壤水分，膜下滴灌处理能防止膜内土壤水分蒸发，同时也会阻隔膜外降水，降水时未能得到与常规滴灌处理等量的水分补充。因此，在未来的试验中需要考虑降水对试验的干扰，选择单向透水性地膜；高灌水定额较低灌水定额虽然能提高 *SWC*、生物量和产量，但未找到天津市夏玉米生长的需水边界，是由于此次试验中灌溉水平梯度较小且灌水定额处理较少，

因此可在后续试验中增加适宜的灌水定额来探究不同灌溉水平对天津市夏玉米生长的影响并寻找夏玉米产量最大的灌溉水平，从而达到精准灌溉和产量最大化的目的^[14-15]。

大田试验虽然精确可靠，但受时空局限性较大，大范围推广的可能性较低。因此，本文利用 AquaCrop 模型模拟了不同滴灌处理下夏玉米根际 *SWC*、生长动态、产量和水分利用效率的变化情况，通过 2 a 试验数据对模型进行校验，结果表明夏玉米根际 *SWC*、冠层覆盖度、生物量、产量及水分利用效率的模拟精度较高；*SWC* 模拟值与实测值变化趋势基本一致，冠层覆盖度和生物量模拟的 *R*² 均在 0.94 以上，*EF* 接近 1，各模拟指标的 *RMSE* 均较低。崔颖等^[16]利用该模型对东北地区玉米籽粒产量进行模拟，结果显示产量模拟值与实测值的 *R*² 为 0.78，*EF* 为 0.74，与本文结果类似；刘琦等^[17]利用该模型对晋中地区玉米根际土壤含水率、冠层覆盖度和产量进行模拟，结果表明土壤含水率的模拟值与实测值变化趋势基本一致，冠层覆盖度模拟值与实测值的 *R*² 高于 0.96、*EF* 为 0.92~0.99、*RMSE* 小于 9.78%，产量模拟值与实测值的 *RMSE* 为 3.13%~9.18%；程超等^[18]用 AquaCrop 模型对不同灌溉和施氮水平下的夏玉米生物量和产量进行模拟，生物量及产量模拟值与实测值的 *R*²、*EF* 和 *RMSE* 分别为 0.860、0.694 和 0.977 t/hm² 及 0.919、0.915 和 0.249 t/hm²。上述研究结果与本试验结果基本吻合，表明 AquaCrop 模型能准确地模拟天津市不同处理下的夏玉米生长。天津市属半湿润区，降水稀少，蒸发量大，水资源不足，因此，采用合理的灌溉方案对提高夏玉米水分利用效率和节约水资源具有重要作用，本文利用参数化模型预测不同灌溉方案下的产量，以产量最大化为目标筛选最优灌溉方案，可以为当地玉米种植业的产量预测与灌溉决策提供参考。

4 结论

1) 常规滴灌高水处理能有效提高作物根际 0~40 cm 土层 *SWC*，灌水定额为 20 mm 时常规滴灌处理在

0~40 cm 土层的土壤含水率高于膜下滴灌处理;膜下滴灌和高水处理均能提高夏玉米生物量和产量。

2) *SWC* 模拟值与实测值的变化趋势基本一致,冠层覆盖度、生物量模拟值与实测值的 R^2 在 0.94 以上, *EF* 接近于 1, 各指标模拟值与实测值的 *RMSE* 均较低,表明该模型能较好地适应天津市夏玉米生长模拟。

3) 灌溉方案 C_6 的预测产量最高,最优灌溉方案为苗期灌溉 20 mm,抽穗和灌浆期各灌溉 10 mm。

参考文献:

- [1] 王明华. 2021年全国粮食产量再创新高[J]. 中国统计, 2021(12): 79.
WANG Minghua. The 2021's national grain output hit a new high[J]. China Statistics, 2021(12): 79.
- [2] 顾新洲, 尹雅清, 董晓敏. 天津市水资源现状及开发利用对策[J]. 海河水利, 2008(6): 5-6.
GU Xinzhou, YIN Yaqing, DONG Xiaomin. The present situation of water resources in Tianjin and the countermeasures for its development and Utilization[J]. Hai River Water Conservancy, 2008(6): 5-6.
- [3] 叶澜涛, 周青云, 李松敏, 等. 滨海盐碱地覆膜和滴灌对玉米盐分离子分布及生物量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 74-83.
YE Lantao, ZHOU Qingyun, LI Songmin, et al. Effects of film mulching and drip irrigation on the distribution of salt ions and biomass of maize in coastal saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2020, 38(4): 74-83.
- [4] 刘匣, 丁莫元, 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): 1 838-1 851.
LIU Xia, DING Dianyan, ZHANG Haojie, et al. Evaluation and analysis on growth dynamics of winter wheat and simulation effect of soil moisture of AquaCrop model under plastic film mulching[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2017, 50(10): 1 838-1 851.
- [5] STEDUTO Pasquale, HSIAO Theodore, RAES Dirk, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water I: Concepts and underlying principles[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 448-459.
- [6] GREAVES Genevieve, WANG Yumin. Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment[J]. Water, 2016, 8(12): 557-557.
- [7] 杜文勇, 何雄奎, SHAMAILA Z, 等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop模型预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 174-178, 183.
DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Prediction of biomass and yield of winter wheat by AquaCrop model[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 174-178, 183.
- [8] WANG Xiangxiang, WANG Qianjiuac, FAN Jun, et al. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129: 95-104.
- [9] FARAHANI Hamid, GABRIELLA Izzi, OWEIS Theib. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 469-476.
- [10] MANIRUZZAMANA M, TALUKDERB M SU, KHAN M H, et al. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 331-340.
- [11] 赵引, 毛晓敏, 薄丽媛. 覆膜和灌水处理下土壤水分动态与玉米生长模拟研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 195-204.
ZHAO Yin, MAO Xiaomin, BO Liyuan. Simulation of soil water dynamics and maize growth under plastic film mulching and Irrigation[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 195-204.
- [12] 董文俊, 刘健峰, 丁莫元, 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.
DONG Wenjun, LIU Jianfeng, DING Dianyan, et al. Responses of growth and water use of plastic film mulched maize to Climate Change[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2020, 38(1): 1-12.
- [13] DIAAFILIAH Hassan, ALAASALIH Ati, ABDULKHALIKSALEH Neima, et al. Calibration and evaluation of AquaCrop for maize (*Zea Mays* L.) under different irrigation and cultivation methods[J]. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(10): 210-219.
- [14] RICHARD Allen, LUIS Pereira, DIRK Raes, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. Fao, Rome, 1998, 300(9): 5 109.
- [15] 尹林萍. 基于AquaCrop模型的天津滨海地区夏玉米产量模拟[D]. 天津: 天津农学院, 2021.
YIN Linping. Simulation of summer maize yield in Tianjin coastal area based on AquaCrop model[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2021.
- [16] 崔颖, 蔺宏宏, 谢云, 等. AquaCrop模型在东北黑土区作物产量预测中的应用研究[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 159-168.
CUI Ying, LIN Honghong, XIE Yun, et al. Application of AquaCrop model to crop yield prediction in black soil region of northeast China[J]. Journal of Crop Sciences, 2021, 47(1): 159-168.
- [17] 刘琦, 龚道枝, 郝卫平, 等. 利用AquaCrop模型模拟旱作覆膜春玉米耗水和产量[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 54-61.
LIU Qi, GONG Daozhi, HAO Weiping, et al. AquaCrop model was used to simulate water consumption and yield of spring maize under plastic film mulching[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 54-61.
- [18] 陈超飞, 柳双环, 郭大辛, 等. 基于AquaCrop模型的夏玉米生长模拟及灌溉制度优化[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 72-82.
CHEN Chaofei, LIU Shuanghuan, GUO Daxin, et al. Simulation of summer maize growth and optimization of irrigation schedule based on AquaCrop model[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2019, 37(3): 72-82.

Research of the Effects of Different Drip Irrigation Treatments on the Growth of Summer Maize and the Adaptability of AquaCrop Model

CHANG Mei, ZHOU Qingyun*, YIN Linping

(Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: 【Objective】 Bioavailable water in soil controls root growth and root water uptake, but it depends on how water is irrigated. The objective of this paper is to investigate the effect of different drip irrigation methods and amounts on growth of summer maize. 【Method】 A two-year field experiment was conducted in Tianjin, China. It consisted of two irrigation methods: conventional drip irrigation (M1) and mulched drip irrigation (M2), each having two irrigation amounts: 10 mm (N1) and 20 mm (N2). Crop growth in each treatment was measured, and the

measured data was used to calibrate the AquaCrop model. The calibrated model was then used to evaluate how the yield responded to irrigation methods and amounts in normal year, from which we obtained the optimal irrigation scheduling to maximize the yield. **【Result】** Soil water content in the top 0~40 cm soil layer under M1+N2 was higher than that under M1+N1 and M2+N2. The biomass and yield under different treatments were ranked in the order of M2+N2 > M2+N1 > M1+N2 > M1+N1. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured soil water contents for all treatments were in the range of 0.645~0.907, 0.461~0.779, and 0.021~0.034, respectively. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured canopy coverage were 0.942~0.992, 0.964~0.990, and 0.463~0.781, respectively. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured biomass were 0.959~0.984, 0.969~0.986, and 0.507~0.614 t/hm², respectively. The $RMSE$ between the simulated and measured yield and water use efficiency were 0.180~0.890 t/hm² and 0.001~0.003 t/(hm²·mm), respectively. **【Conclusion】** Under conventional drip irrigation, increasing irrigation amount can improve water content in the 0~40 cm soil layer; water content in the 0~40 cm soil layer under conventional irrigation was higher than the mulched treatment when irrigation amount was 20 mm. Mulching or increasing irrigation amount can improve biomass and yield of the summer maize. The AquaCrop model can reproduce the growth of summer maize. The optimal irrigation scheduling to maximize maize yield in the studied region is to irrigate 20 mm of water at seedling stage, 10 mm at heading stage, and 10 mm at filling stage.

Key words: AquaCrop model; summer maize; soil water content; canopy coverage; biomass and yield; WUE

责任编辑: 韩 洋

(上接第 31 页)

Effect of Prolonged Drought on Chlorophyll Fluorescence, Yield and Water Use Efficiency of Summer Maize

LI Yanbin, LU Zhengguang*, LI Daoxi, ZHOU Tingquan, HOU Haosen, LIU Huan, YANG Peiwen

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **【Objective】** Drought is a common stress faced by crops during their growth. Its impact on crop growth and ultimate yield depends on when droughts occur as well as their duration and severity. This paper is to investigate the impact of prolonged droughts on chlorophyll fluorescence, yield and water use efficiency (WUE) of summer maize, and provide a guidance for enhancing drought resistance and ensuring stable yield of summer maize.

【Method】 Pot experiment was conducted at a site with mobile rain shed covering. Maize variety DHA757 was used as the model plant; the drought was artificially imposed at jointing-stage (B), tasseling stage (C), and filling stage (G), respectively, at normal (CK), light (1), medium (2), or heavy (3) level. There were nine treatments: two drought treatments with different severity occurring only at jointing-stage, three consecutive droughts occurring continuously across jointing and tasseling stages, three consecutive droughts occurring continuously across jointing, tasseling and filling stage, and one control (without drought). In each treatment, we measured water consumption, F_v/F_m , F_v/F_o , yield, and water use efficiency (WUE) of the crop. **【Result】** Continuous drought significantly reduced water consumption, $SPAD$, F_v/F_m , and F_v/F_o of the maize, compared to the control. The decrease in these parameters increased with drought severity. All drought treatments reduced the crop yield. For the single drought treatment at the jointing-stage, the yield reduction of B3 was most significant, followed by B2. For droughts lasting two stages and three stages, light droughts did not result in a significant reduction in yield, but other droughts reduced the yield significantly. Compared to CK, B2, B1+C1 and B2+C2 increased WUE by 5.1%, 2.8% and 6.3%, respectively, indicating that a light drought was beneficial to improving WUE . **【Conclusion】** Considering both yield and WUE , a medium drought at the jointing stage (with soil water content dropping to 50%~60% of the field capacity), and a prolonged drought lasting two stages with the soil water content in the range of 60%~70% of the field capacity are suitable for reducing water evaporation without considerably compromising the yield. Our results provide guidance to help sustain summer maize production in regions susceptible to drought.

Key words: continuous drought; summer maize; chlorophyll fluorescence characteristics; yield; water use efficiency

责任编辑: 韩 洋