

唐博文, 孟凡香, 孟波, 等. 基于 AquaCrop 模型的玉米产量与水分利用效率模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1224-1238. TANG B W, MENG F X, MENG B, et al. Simulation of maize yield and water use efficiency based on the AquaCrop model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1224-1238. (in Chinese)

基于 AquaCrop 模型的 玉米产量与水分利用效率模拟

唐博文, 孟凡香, 孟波, 王瑾, 范一鸣

(黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要:以黑龙江省松嫩平原为研究区, 探究不同降水年类型下灌溉对玉米产量和水分利用效率(water use efficiency, E_{wu})的影响, 并制定科学合理的玉米灌溉方案, 以提高农业水资源的利用效率。考虑玉米不同生育期和灌水定额的影响, 共拟定 37 种灌溉方案, 并将其输入本地化的水作物模型(AquaCrop)中进行模拟分析。探究不同降水年类型下雨养和灌溉对玉米产量、水分利用效率和灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, E_{wui})的影响, 确定关键灌溉期。通过对不同降水年类型下玉米产量和 E_{wu} 的对比关系进行分析, 确定最优的灌溉制度。结果表明: AquaCrop 模型能较好地模拟松嫩平原玉米的生长过程; 在玉米关键生育期, 适时适量的灌溉能确保作物获得足够的水分, 减少产量损失, 提高 E_{wu} , 但过度灌溉会导致两者降低; 综合考虑玉米产量和 E_{wu} , 在特枯水年, 苗期-拔节期(20 mm)、拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm)为最优灌溉方案; 在枯水年, 拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm)为最优灌溉方案, 平水年和丰水年降水可以满足玉米水分需求, 不需要灌溉。研究可为黑龙江省松嫩平原地区制定更加合理有效的玉米灌溉制度提供相应的理论依据, 从而更好地应对气候变化和水资源短缺带来的挑战, 保障粮食安全。

关键词: 玉米; AquaCrop 模型; 产量; 水分利用效率; 灌溉水利用效率

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0122

水资源可持续利用与粮食安全保障是社会持续发展的两大基石, 它们确保了人民群众的基本生活需求, 促进了经济的稳定增长和生态的良性循环^[1]。然而, 全球水资源过度消耗给农业生产带来了严峻挑战^[2]。为此, 农业生产必须做出调整, 包括改变作物种植结构、推广农业节水技术、优化灌溉方式等^[3-4], 同时加强水资源的管理和保护, 确保农业生产的可持续性。20 世纪 70 年代, 提出了作物模型的概念^[5], 研究者最初借助数学公式描绘植物生理过程及与环境因素的相互作用。随着计算机技术的兴起和计算能力的增强, 研究者开始将多个相关的数学公式整合到一起, 构建出更加综合的作物模型。进入 20 世纪 80、90 年代, 一系列更为精细和全面的数学模型相继问世, 如水作物模型(FAO crop model to simulate yield response to water, AquaCrop)、世界粮

食研究模型(world food studies model, WOFOST)和作物系统模型(crop systems model, CropSyst)等。特别是 AquaCrop 模型, 由联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)开发, 用于评估环境和管理对作物生产的影响^[6]。该模型以其少量的输入参数、简易的操作流程以及高精度的模拟结果为显著特点^[7-8]。作为一款水驱动模型, 能够有效地模拟不同作物种类、灌溉策略及地面覆盖模式下土壤水分运动、作物生长周期与产量等关键指标^[9-11]。国内外学者广泛关注 AquaCrop 模型, 通过模拟可深入理解农作物对水资源的利用情况, 评估不同管理策略对作物产量和水分利用效率(water use efficiency, E_{wu})的影响^[12-14], 并为农业水资源管理提供科学建议^[15]。

张铁楠等^[16]以哈尔滨地区春小麦为研究对象,

收稿日期: 2024-01-02 修回日期: 2024-07-21 网络出版时间: 2024-09-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240902.1630.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109055); 黑龙江大学杰出青年科学基金项目(JCL202105)

作者简介: 唐博文(1998—), 男, 河南新乡人, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: tangbowen1231@163.com

通信作者: 孟凡香(1984—), 女, 黑龙江大庆人, 教授, 博士, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 2020036@hju.edu.cn

运用 AquaCrop 与 WOFOST 两种作物模型,模拟了春小麦的地上生物量、产量及土壤体积含水率,研究发现,在气象条件正常年份,两模型均能精确反映作物生长发育过程及产量,且误差在合理范围之内。Todorovic 等^[7]比较了 AquaCrop、WOFOST 和 CropSyst 这 3 种模型,发现 AquaCrop 和 CropSyst 在无水胁迫条件下表现更佳^[17]。值得注意的是,AquaCrop 即使参数需求较少,仍能保持高精度,展现出显著优势。孙哲等^[18]利用 AquaCrop 模型,对 3 种主要作物的耗水量和产量进行了模拟,结果显示制种玉米的模拟效果最好。综上所述,AquaCrop 是一款模拟精度出色的作物生长模型。然而,为确保模型在不同气候区域的准确性,应使用当地实测数据对模型参数进行细致的测试、校准和验证。

黑龙江省松嫩平原是我国重要的商品粮生产基地,其黑土面积占东北黑土面积的 59%^[19],对国家粮食安全战略至关重要。然而,干旱化趋势导致该区域环境剧变,水资源短缺成为突出问题,玉米生长发育过程受到限制。鉴于此,本研究聚焦松嫩平原,旨在通过合理利用水资源,挖掘并保障该地区的农业生产潜力^[20]。基于 60 年长期历史气象数据,本研究使用 AquaCrop 模型模拟玉米生长发育和产量形成,针对不同降水年类型下的雨养和灌溉情景进行全面分析,对玉米产量、 E_{wU} 和灌溉水利用效率 (irrigation water use efficiency, E_{IWU}) 进行数据分析,旨在揭示不同降水年类型下雨养和灌溉对上述指标的影响,探索最优灌溉策略,以实现最高的玉米产量,同时兼顾 E_{wU} 和 E_{IWU} 的综合效益,为干旱和半干旱地区的玉米种植提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松嫩平原位于 122°38'78"E~128°55'29"E, 44°06'31"N~51°00'02"N,是我国东北三大平原中面积最大的平原,跨越内蒙古自治区、黑龙江省和吉林省。选取黑龙江省内松嫩平原部分(以下简称松嫩平原)作为研究区域。该区域属于松花江流域,松花江与嫩江在此交汇^[21]。全年温差较大,冬季最低气温可达-30℃,夏季最高气温可达 35℃,多年平均气温为 2~6℃,无霜期约为 100~160 d,多年平均降水量在 370~450 mm。松嫩平原多年平均月降水量见图 1。降水主要集中在 6—9 月^[22],与玉米的生育期吻合,雨热同期的气候为玉米提供了理想生

长环境。然而,受半干旱季风气候影响,降水量相对较少,尤其是西部半干旱区,近年来年降水量不足 300 mm。依据《中国农业物候地图集》对作物生长区域的划分,该地区玉米种植以雨养为主,玉米的灌溉面积仅占种植面积的 8%。

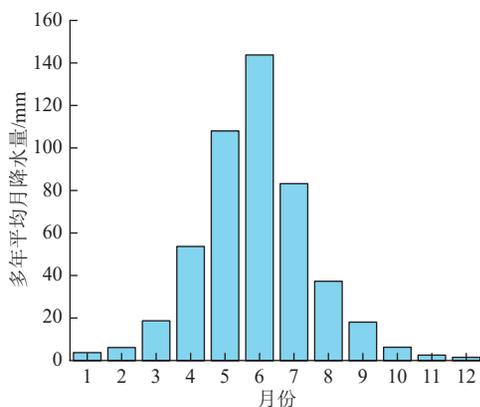


图 1 研究区域多年平均月降水量

Fig. 1 Multi-year average monthly precipitation in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 AquaCrop 模型原理、参数与验证

AquaCrop 模型作为一种广泛应用的作物模型,能够综合考虑气象、土壤、作物和管理等多重因素的影响,在全球不同地区模拟作物生长和产量形成。该模型以日为时间步长,具体包括 4 个核心子模块:气象模块涵盖降水量、参考作物需水量(ET_0)、 CO_2 含量、最高气温、最低气温;土壤模块关注土壤和水平衡管理;作物模块包括作物生长、发育、衰老和产量;管理模块^[23]涉及灌溉和田间管理。

为了避免生产性用水与非生产性用水相混淆,模型将作物蒸散分为土壤蒸发(E)和作物蒸腾(T_r)两部分,最终产量就变成了生物量(B)和收获指数(I_H)之间的关系^[24]:

$$Y = B \times I_H \quad (1)$$

$$B = W_p \times \sum T_r \quad (2)$$

式中: Y 为作物产量, t/hm^2 ; I_H 为收获指数; B 为累积地上生物量, t/hm^2 ; W_p 为水分生产效率, kg/m^3 ; T_r 为作物蒸腾量, mm 。

AquaCrop 模型提供了玉米生长的默认参数设置,但由于不同地区的气候、土壤和种植方式等因素存在差异,这些参数并不能完全适应所有情况,因此,为了更准确地模拟玉米的生长和产量,需要对模型参数进行校准和验证。根据模型手册,模型参数分为保守参数和非保守参数。保守参数指模型推荐的标准参数,通常不需要进行调整。非保守

参数需要结合模型手册提供的取值范围, 参照 Vanuytrecht 等^[25]的校准顺序, 对冠层覆盖度 C_c 、生物量和产量采用“试错法”进行逐步校准^[26]。模型的部分校准参数见表 1。

表 1 AquaCrop 模型校准参数
Tab. 1 AquaCrop model calibration parameters

参数	符号	校准值
初始冠层覆盖度/%	C_{c_0}	0.34
最大冠层覆盖度/%	$C_{c_{max}}$	91
最大有效根深/mm	Z_{max}	2.3
冠层生长系数/(%·d ⁻¹)	C_{GC}	14.2
冠层衰落系数/(%·d ⁻¹)	C_{DC}	11.7
作物蒸腾系数	K_{cr}	1.05
作物水分生产率/(g·m ⁻²)	W_p	33.8
参考收获指数/%	I_{HI}	40
冠层扩张的土壤水分枯竭阈值-上限阈值 (以占根区土壤总有效水分的百分比计)/%	$P_{exp_{upper}}$	0.60
冠层扩张的土壤水分枯竭阈值-下限阈值 (以占根区土壤总有效水分的百分比计)/%	$P_{exp_{lower}}$	0.14

选取决定系数(R^2)、均方根误差(E_{RMS})和模型性能指数(E_F)对模型精度进行评价^[27]。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$E_F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

式中: n 为实测值个数; M_i 和 S_i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示实测值和模拟值, \bar{M} 为实测值的平均值。 E_{RMS} 反映的是模拟值与实测值的差值大小, E_{RMS} 越接近 0, 模型精度越高。 E_F 决定了残差值的相对大小以及实测值和模拟值之间的拟合程度, R^2 和 E_F 越趋近于 1, 模型精度越高。

1.2.2 指标的测定与计算

冠层覆盖度 C_c 。 C_c 是指土壤表面绿色冠层覆盖的面积百分比, 是表征大田作物长势、产量和系统变化的重要变量。本研究计算玉米不同生育阶段 C_c 数据用于模型参数的校准与验证。每个生育阶段选择 3 株代表性植株, 通过式(5)计算得叶面积指数(I_{LA}), 再通过式(6)计算得 C_c :

$$I_{LA} = \frac{0.75\rho \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} W_{ij})}{m} \quad (5)$$

$$C_c = 1.005 \left[1 - e^{(-0.6I_{LA})} \right]^{1.2} \quad (6)$$

式中: ρ 为种植密度, 株/hm²; L_{ij} 和 W_{ij} 分别为叶片最大长度和宽度, mm; n 为每株玉米的叶片数; m 为玉米株数。

水分利用效率和灌溉水利用效率。在作物生产领域, E_{WU} 是用来衡量作物在消耗单位质量水的情况下所制造的干物质量的指标, E_{WU} 越高则作物吸收水分的效率越高。 E_{IWU} 就是有效灌溉水资源的比率, 即真正被作物利用的水量与用于灌溉的水量之比。计算这两个指标用于判断灌溉对作物产量的影响, 以探索和确定合理的灌溉计划, 计算公式为

$$E_{WU} = \frac{Y}{ET_c} \quad (7)$$

$$E_{IWU} = \frac{G - G_0}{I} \times 1000 \quad (8)$$

式中: E_{WU} 为水分利用效率, kg/m³; Y 为产量, t/hm²; ET_c 为作物耗水量, mm; E_{IWU} 为灌溉水利用效率, kg/m³; G 为灌溉条件下的产量, t/hm²; G_0 为雨养的产量, t/hm²; I 为生育期灌溉量, mm。

净灌溉需水量。作物的总需水量通常包含两个来源: 自然降水和灌溉供水。在作物生长周期内, 当自然降水量不足以满足作物的需水量时, 灌溉就成为必要的补充手段。净灌溉需水量是指为了满足作物生长所需而必须通过灌溉提供的额外水量, 它是作物总需水量与有效降水量之间的差额^[28-29]。净灌溉需水量的计算公式为

$$I_R = ET_c - P_e \quad (9)$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (10)$$

$$P_e = \alpha P_0 \quad (11)$$

式中: I_R 为净灌溉需水量, mm; ET_c 为作物需水量, mm; P_e 为有效降水量, mm; K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物需水量, mm; P_0 为总降水量, mm; α 为有效利用系数, 当 $P_0 \leq 5$ mm 时 $\alpha=0$, 当 5 mm $< P_0 < 50$ mm 时 $\alpha=0.9$, 当 $P_0 \geq 50$ mm 时 $\alpha=0.75$, 生育阶段多次降水过程的有效降水量累积得到该阶段有效降水量^[30]。

研究表明, 在缺少试验资料的情况下, 作物系数 K_c 可以采用 FAO 推荐的标准作物系数和修正公式进行修正。FAO 推荐标准条件(最小相对湿度约为 45%, 风速约 2 m/s 的半湿润气候)下玉米发育初

期、中期、后期的3个标准作物系数: $K_{c_{ini}}=0.3$, $K_{c_{mid}}=1.2$, $K_{c_{end}}=0.35$ 。

$$K_{c_{mid}} = K_{c_{mid}(tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(R_{H_{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (12)$$

式中: $K_{c_{mid}(tab)}$ 为 FAO-56 推荐作物系数; u_2 为生长中期 2 m 高度日平均风速, m/s; $R_{H_{min}}$ 为生长中期日最小相对湿度的平均值, %; h 为生长中期作物的平均高度, m。

1.2.3 模拟情景设置

为了研究松嫩平原玉米种植区的灌溉需求, 收集并分析 1961—2020 年该地区 12 个站点的气象数据, 计算得出平均净灌溉需水量^[31]。为了便于管理和分析, 将松嫩平原玉米种植区划分为 5 个区域, 依据净灌溉需水量的范围划分: I 净灌溉需水量 201~205 mm、II 净灌溉需水量 205~240 mm、III 净灌溉需水量 240~275 mm、IV 净灌溉需水量 275~310 mm 和 V 净灌溉需水量 310~345 mm。表 2 展示了各灌溉分区对应站点分布情况。为了消除生育期外降水数据的影响, 采用玉米生育期(5—9 月)的降水数据, 使用经验频率法划分降水年类型, 选取北安、嫩江、富裕、安达和齐齐哈尔作为典型站点, 进而确定 5 个区域中典型站点的特枯水年(95%)、枯水年(75%)、平水年(50%)、丰水年(25%), 见表 3。

表 2 灌溉分区对应站点分布情况

Tab. 2 The distribution of stations corresponding to the irrigation zones

灌溉分区	气象站点分布
I	北安
II	海伦、北林、克山、嫩江
III	明水、哈尔滨、富裕
IV	肇州、安达
V	齐齐哈尔、泰来

表 3 典型站点降水年类型划分

Tab. 3 Typical station precipitation year pattern classification

典型站点	降水年类型和年份			
	特枯水年	枯水年	平水年	丰水年
北安	1976	2006	1961	1983
嫩江	2005	1977	1967	1989
富裕	1979	1968	2017	1981
安达	2001	1978	1986	1987
齐齐哈尔	1975	1977	1984	2005

选择苗期-拔节期、拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期 3 个生育阶段制定模拟灌溉方案。灌溉模拟方案设置为雨养 CK(不灌溉)、灌 1 水(生育期内灌溉 1 次)、灌 2 水(生育期内灌溉 2 次)和灌 3 水(3 个生育阶段都进行灌溉), 灌水定额设计为 0、20、40、60 mm 的灌水量梯度, 共产生了 37 个灌溉方案(表 4)。

表 4 灌溉方案设定

Tab. 4 Irrigation scheme setting

灌溉方案	灌水定额/mm			灌溉定额/mm	灌溉方案	灌水定额/mm			灌溉定额/mm
	苗期-拔节期	拔节-抽雄期	抽雄-灌浆期			苗期-拔节期	拔节-抽雄期	抽雄-灌浆期	
I ₁	20	0	0	20	I ₁₉	20	20	20	60
I ₂	40	0	0	40	I ₂₀	40	40	40	120
I ₃	60	0	0	60	I ₂₁	60	60	60	180
I ₄	0	20	0	20	I ₂₂	40	20	20	80
I ₅	0	40	0	40	I ₂₃	20	40	20	80
I ₆	0	60	0	60	I ₂₄	20	20	40	80
I ₇	0	0	20	20	I ₂₅	60	20	20	100
I ₈	0	0	40	40	I ₂₆	20	60	20	100
I ₉	0	0	60	60	I ₂₇	20	20	60	100
I ₁₀	20	20	0	40	I ₂₈	40	40	20	100
I ₁₁	40	40	0	80	I ₂₉	20	40	40	100
I ₁₂	60	60	0	120	I ₃₀	40	20	40	100
I ₁₃	20	0	20	40	I ₃₁	60	60	20	140
I ₁₄	40	0	40	80	I ₃₂	20	60	60	140
I ₁₅	60	0	60	120	I ₃₃	60	20	60	140
I ₁₆	0	20	20	40	I ₃₄	60	40	40	140
I ₁₇	0	40	40	80	I ₃₅	40	60	40	140
I ₁₈	0	60	60	120	I ₃₆	40	40	60	140

1.3 数据来源

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>), 覆盖了 1961 年至 2020 年共 60 年的逐日气象数据。通过利用 FAO 发布的 ET₀ Calculator 工具计算参考作物需水量(ET₀)^[32], 并建立气象数据库。采用国家生态数据中心资源共享服务平台 (www.nesdc.org.cn) 提供的二氧化碳浓度数据^[33]: 基于 CMIP6 历史和未来情景下的全球逐月大气 CO₂ 浓度数据集。同时收集了研究区的土壤数据, 包括土层深度、土壤水分等参数。

利用黑龙江省玉米种植的田间试验数据对 AquaCrop 模型进行校准和验证, 试验数据见表 5。试验 1 和试验 2 位于黑龙江省齐齐哈尔市克山县^[34],

农田土壤类型为褐色土, 浅层沙含量 38.0%, 浅层淤泥含量 39.0%, 浅层黏土含量 23.0%。试验 2 在生育期共灌溉 3 次, 分别在苗期-拔节期、拔节-抽雄期、抽雄-灌浆期 3 个生育阶段进行灌溉, 灌溉定额为 8、30 和 10 mm。试验 3 和试验 4 分别位于黑龙江省大庆市肇州县水利科学研究所^[35]和肇州县农业技术推广中心^[36], 农田土壤类型为黑钙土, 浅层沙含量(质量分数)39.0%, 浅层淤泥含量(质量分数)39.0%, 浅层黏土含量(质量分数)22.0%。试验 3 在生育期间共灌溉 3 次, 分别在拔节期、抽雄期、灌浆期进行灌溉, 3 个生育期灌溉定额为 39.99 mm, 比例为 1:1:1。

表 5 用于 AquaCrop 模型校准与验证的田间试验数据

Tab. 5 Field trial data for AquaCrop model calibration and validation

试验名称	试验1	试验2	试验3	试验4
地理位置	126°32'E, 48°13'N	126°32'E, 48°13'N	125°35'E, 45°17'N	125°17'E, 45°42'N
年份	2017	2017	2014	2017
生育期	5月2日—9月30日	5月2日—9月30日	4月28日—9月27日	5月3日—9月27日
处理方法	雨养	灌溉	灌溉	雨养
数据用途	模型校准	模型验证	模型验证	模型验证

注: 灌溉指玉米生育期灌溉3次, 分别为玉米苗期-拔节期、拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期; 雨养指玉米的生长仅依赖于降水。

同时根据降水年类型的划分结果, 肇州县 2017 年为枯水年, 肇州县 2014 年、2017 年为平水年。过去, 一些学者将 AquaCrop 模型应用于区域尺度, 例如: Iqbal 等^[37]在滦城进行了现场试验, 并用现场数据对模型进行了校准和验证, 在石家庄再次验证了他们的校准模型, 以获得两个地区的结果, 用来反映华北平原的农业生产, 本研究与之类似, 使用了研究区域北部克山和南部肇州试验数据进行模型校准与验证, 校准后的 AquaCrop 模型用于模拟分析松嫩平原不同降水年类型下玉米产量及 E_{wU} 。

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型校准和验证

基于 2017 年克山县玉米全生育期的田间试验数据, 选用 C_c 、生物量和产量 3 个参数对 AquaCrop 模型进行校准和验证, 评估作物模型在当地的适用性。具体结果见图 2 和表 6。由图 2(a)和(b)可知: 无论在雨养条件还是灌溉条件下, C_c 模拟值与实测

值变化规律一致, 两者高度相关, R^2 和 E_F 均超过 0.99, E_{RMS} 范围在 0.50%~2.57%。本研究中 C_c 的结果与前人的研究结果相仿, 如: 常梅等^[8]在华北平原对玉米生长发育进行模拟, 得到各处理 C_c 的 R^2 为 0.942~0.992、 E_F 为 0.964~0.990、 E_{RMS} 为 0.463%~0.781%; Feng 等^[38]利用该模型模拟东北地区覆盖滴灌下玉米生长发育, 得到 C_c 的 R^2 为 0.99、 E_F 为 0.89; 韩桐等^[39]在黑龙港流域利用该模型模拟夏玉米生长发育, 得到 C_c 的 R^2 为 0.97、 E_{RMS} 为 0.88%。这表明, 校准后的 AquaCrop 模型具有较高的精确度, 适用于模拟 C_c 的变化规律。

由图 2(c)~2(d)可知: AquaCrop 模型在模拟玉米生物量时, 无论在雨养还是灌溉条件下, 其模拟值与实测值变化趋势一致, 但模型在作物后期预测的生物量往往高于实测值。这一发现与先前的研究结果相呼应, 如: 常梅等^[8]在华北平原地区模拟玉米生长时, 各处理生物量的 R^2 、 E_{RMS} 和 E_F 分别为 0.959~0.984、0.507~0.614 t/hm²、0.969~0.986; Heng

等^[40]在美国佛罗里达州对全灌和缺灌处理下的玉米生长进行模拟, 生物量的 E_{RMS} 在全灌条件下为 0.86 t/hm^2 , 在缺灌条件下为 1.56 t/hm^2 , E_F 在全灌

条件下为 0.99 , 在缺灌条件下为 0.77 。这两个数值都表明模型的模拟结果与实测值之间的拟合度很好。

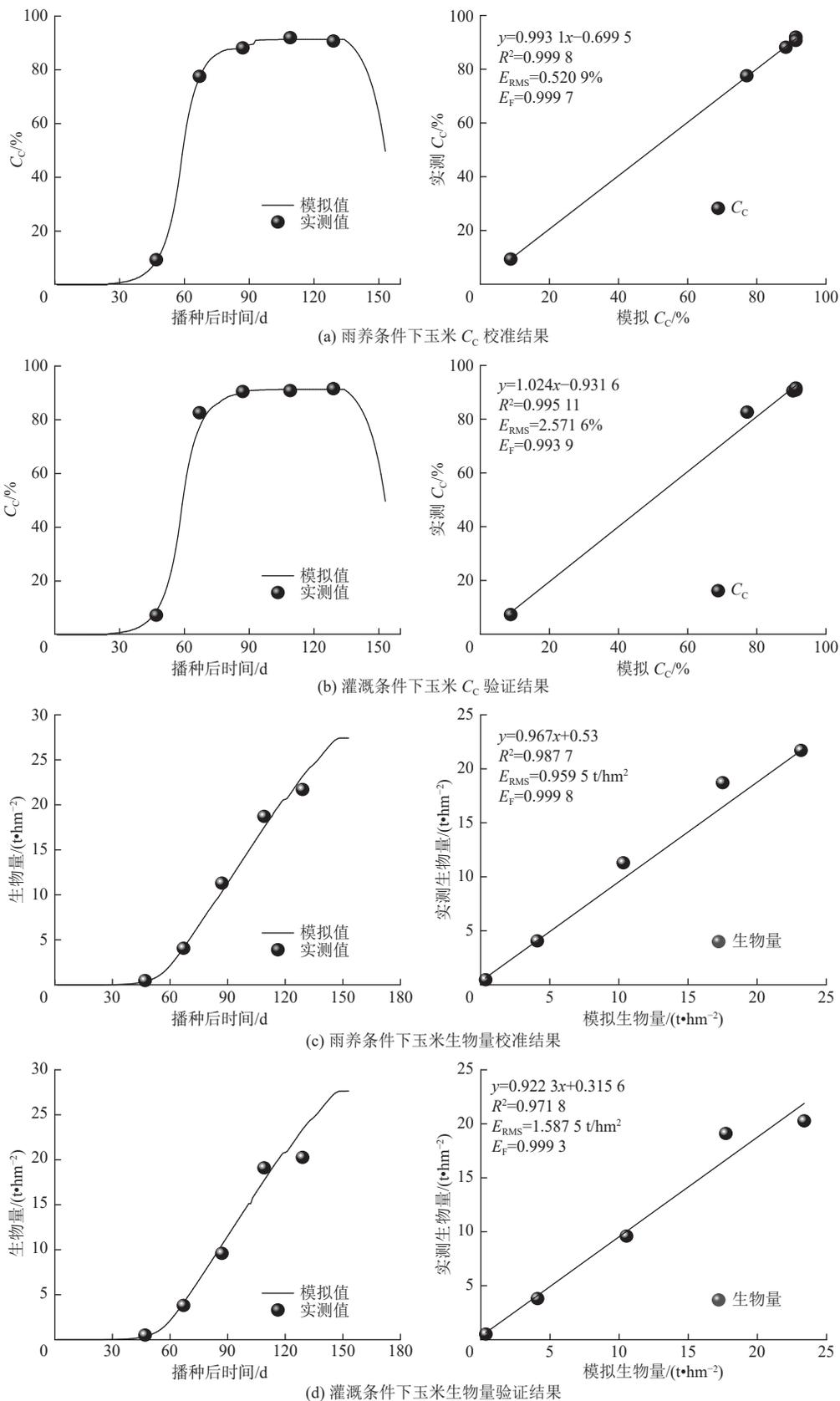


图 2 克山县 2017 年玉米 C_c 和生物量校准与验证结果

Fig. 2 Calibration and validation results of C_c and biomass of maize in Keshan County in 2017

由表 6 可知: AquaCrop 模型在产量模拟时,除试验 2 外,其余试验模拟产量均高于实测产量。通过计算得到产量的 R^2 为 0.892、 E_{RMS} 为 0.23 t/hm²、 E_F 为 0.888。这一结果与前人的研究结果相仿,如:崔颖等^[26]在东北黑土区利用该模型模拟玉米产量,得到产量的 R^2 为 0.78、 E_F 为 0.74; Ahmadi 等^[41]在伊朗半干旱环境中应用 AquaCrop 模型对玉米产量进行模拟,在模型校准阶段产量的 E_{RMS} 为 0.71 t/hm²,在验证阶段产量的 E_{RMS} 为 1.77 t/hm²; Mebane 等^[42]利用该模型对 1974 年和 1975 年美国宾夕法尼亚州的玉米产量进行模拟,得到产量的 E_{RMS} 值分别为 0.67 t/hm²和 1.03 t/hm²。综上所述, AquaCrop 模型在经过适当的校准后,能够对玉米的 C_C 、生物量以及产量提供准确的模拟。

表 6 不同灌溉情景下玉米产量模拟值与实测值对比

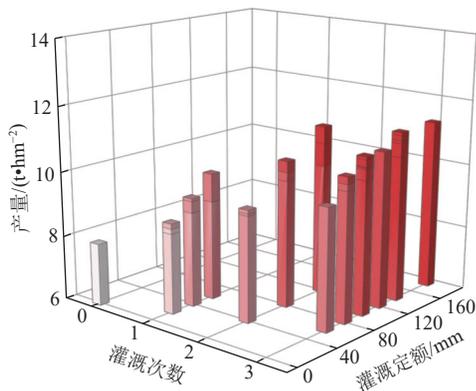
Tab. 6 Comparison of simulated and measured maize yields under different irrigation scenarios

试验	地点(年份)	处理方式	产量/(t·hm ⁻²)	
			实测值	模拟值
试验1	克山(2017)	雨养	12.83	13.12
试验2	克山(2017)	灌溉	13.85	13.53
试验3	肇州(2014)	灌溉	14.32	14.49
试验4	肇州(2017)	雨养	12.65	12.67

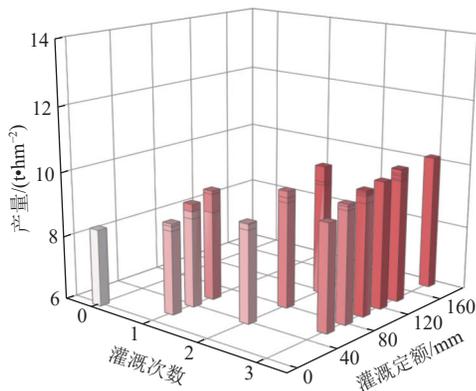
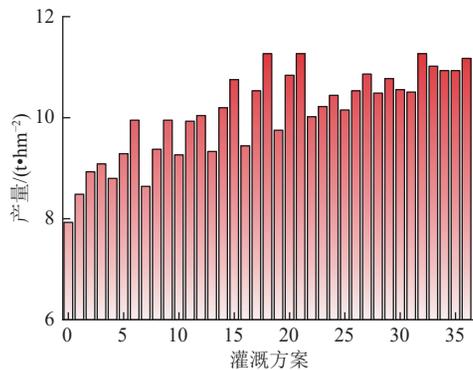
结果表明, AquaCrop 模型在校准和验证过程中,针对研究区域内不同灌溉条件下玉米的冠层生长、生物量积累和最终产量的模拟,展现出了良好的准确性和适用性,可为该地区的农业生产提供一定的参考和指导。然而,分析也指出了一些限制因素和潜在的改进方向:(1)实测的叶面积指数(I_{LA})与模型预测值存在不一致性,这可能源于模型对平均叶片尺寸和叶片数量的假设与实际情况的偏差;(2)模型没有考虑病虫害和肥力供应等因素以及试验中没有明确报告用于测量玉米 C_C 的播种日期,这可能会影响到模型的预测结果。为进一步提高模型的预测能力,在模型的实际应用中需要对这些限制因素进行更全面的考虑和校准。

2.2 不同灌溉方案对产量的影响

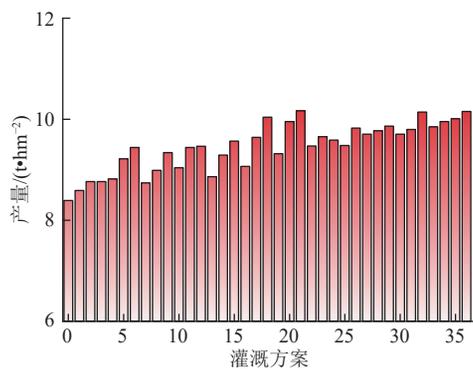
基于校准后的 AquaCrop 模型,对不同灌溉方案下研究区玉米产量进行模拟。图 3 显示了不同降水年类型雨养和灌溉条件下的产量比较。在雨养条件下不同降水年类型的玉米产量平均值分别为 7.93、8.42、9.72、9.13 t/hm²,在灌溉条件下玉米产量平均值为 10.19、9.53、9.78、9.13 t/hm²。与雨养条件相比,灌溉后作物平均产量在特枯水年、枯水年、平水年和丰水年分别提高了 28.5%、13.1%、0.6% 和 0。

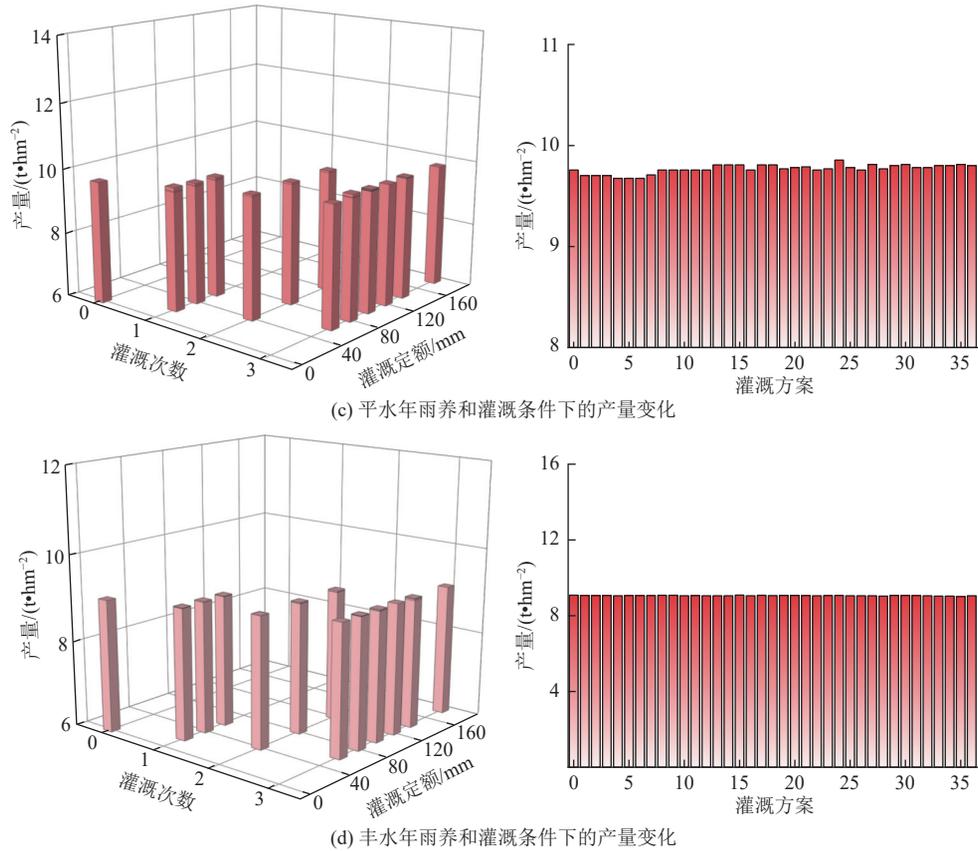


(a) 特枯水年雨养和灌溉条件下的产量变化



(b) 枯水年雨养和灌溉条件下的产量变化





注: 二维柱状图中灌溉方案为 0 代表 CK、1 代表方案 I₁、2 代表方案 I₂、..., 以此类推。

图 3 不同降水年类型雨养和灌溉条件下的产量变化

Fig. 3 Variation of yield under rain-fed and irrigated conditions in different precipitation years

在特枯水年, 产量随灌溉次数和灌溉量的增加而增长, 在方案 I₃₂ 处平均产量达到最大值 11.33 t/hm², 灌溉组合是苗期-拔节期(20 mm)、拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm), 方案 I₅(0、60、60 mm)得到产量次之; 在枯水年方案 I₂₁ 处平均产量达到最大值 10.23 t/hm², 灌溉组合是苗期-拔节期(60 mm)、拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm); 在平水年, 平均产量在方案 I₉ 处首先到达最大值 9.8 t/hm², 灌溉组合是抽雄-灌浆期(60 mm), 但与雨养产量相比, I₉ 产量增幅仅增产了 0.8%, 因此平水年考虑在抽雄-灌浆期进行补充灌溉; 在丰水年, 玉米多年平均产量随着灌溉次数和灌溉量的增加并没有显著波动, 甚至部分灌溉方案导致减产, 因此不需要补充灌溉。

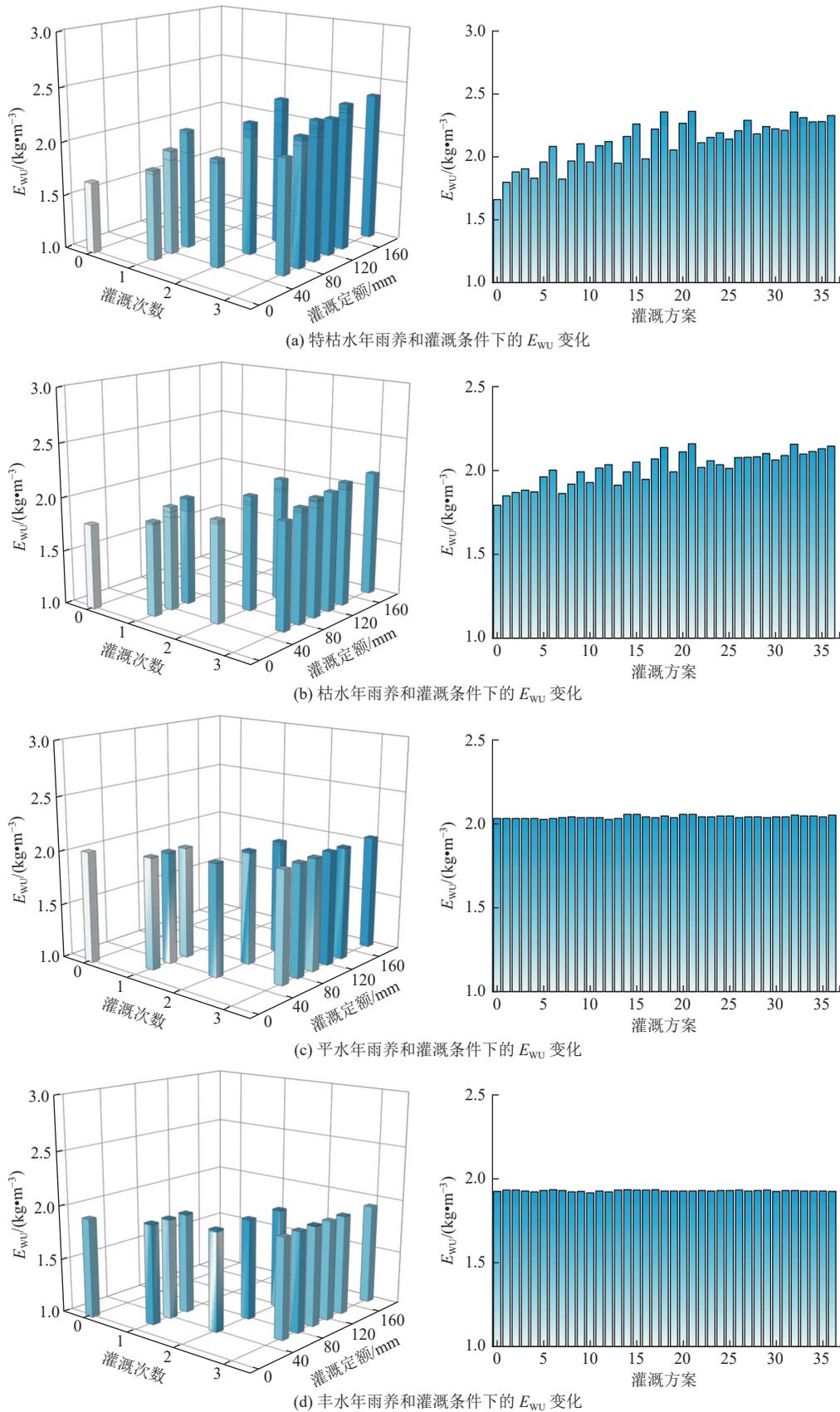
2.3 不同灌溉方案对 E_{WU} 的影响

松嫩平原 1961—2020 年玉米生育期, 雨养和灌溉条件下特枯水年、枯水年、平水年、丰水年 E_{WU} 见图 4。玉米在雨养条件下的特枯水年、枯水年、平水年和丰水年平均 E_{WU} 分别为 1.66、1.84、2.04 和 1.93 kg/m³, 灌溉条件下分别为 2.13、2.03、2.05、1.93 kg/m³。灌溉情景下的 E_{WU} 平均值分别比雨养情景下增加了 28.3%、10.3%、0.5% 和 0%。

不同降水年类型下, E_{WU} 随灌水量和灌水次数的变化趋势一致。在特枯水年, E_{WU} 在处理 I₁₈ 处首先达到最大值 2.36 kg/m³, 灌溉组合是拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm); 在枯水年, E_{WU} 在处理 I₂₁ 处首先达到最大值 2.16 kg/m³, 灌溉组合是苗期-拔节(60 mm)、拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm); 在平水年, E_{WU} 在处理 I₉ 处首先达到最大值 2.06 kg/m³, 并且不再因灌溉量的增加发生较大变化; 在丰水年, 产量不随灌溉量的增加而增加, 且在雨养条件时 E_{WU} 达到最高值 1.93 kg/m³, 同时产量 9.13 t/hm² 为最大值, 因此丰水年不需要灌溉。总体而言, 在特枯水年和枯水年 E_{WU} 增幅较大^[43], 但在平水年和丰水年, 灌溉没有显著提高研究区中大多数地区的产量, 且 E_{WU} 几乎没有变化。

2.4 不同灌溉方案对 E_{IWU} 的影响

不同降水年类型下, E_{IWU} 随灌水量和灌水次数的变化趋势一致。松嫩平原 1961—2020 年玉米灌溉条件下特枯水年、枯水年、平水年、丰水年 E_{IWU} 见图 5。不同降水年类型玉米在灌溉条件下的特枯水年、枯水年、平水年和丰水年平均 E_{IWU} 分别为 28.49、13.94、0.68 和 -0.06 kg/m³。



注: 二维柱状图中灌溉方案为 0 代表 CK、1 代表方案 I₁、2 代表方案 I₂、... 以此类推。

图 4 不同降水年类型雨养和灌溉条件下的 E_{WU} 变化

Fig. 4 Variation of E_{WU} under rain-fed and irrigated conditions for different precipitation years

在特枯水年, E_{WU} 在处理 I₄ 处首先达到最大值 41.91 kg/m³, 灌溉组合是苗期-拔节期(20 mm); 在枯

水年, E_{WU} 在处理 I₂₃ 处首先达到最大值 16.27 kg/m³, 灌溉组合是苗期-拔节期(20 mm)、拔节-抽雄期

(40 mm)和抽雄-灌浆期(20 mm);在平水年, E_{WU} 在处理 I_7 处首先达到最大值 2.85 kg/m^3 , 抽雄-灌浆期(60 mm);在丰水年, E_{WU} 随灌溉量的增加而降低, 即过量的灌溉导致土壤湿度持续过高, 可能会影响根系的呼吸, 增加病害的发生, 或者导致作物生长不平衡, 最终减少产量, 在这种情况下, 灌溉水量的增加并没有带来相应的产量增加, 导致 E_{WU} 下降, 加之丰水年的降雨集中期和作物生育期重合, 因此丰水年不需要灌溉。综上所述, 特枯水年和枯水年玉米生育期 E_{WU} 较大, 平水年和丰水年玉米生育期 E_{WU} 低, 甚至为负值。

3 讨论

3.1 不同降水年类型灌溉方案对产量和用水效率的影响

灌 1 水情况。特枯水年和枯水年, 抽雄-灌浆期灌溉得到的产量最大, 拔节-抽雄期(60 mm)的产量次之。原因是在干旱年, 玉米拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期这两个关键生长阶段时遭受严重的水分短缺。在这两个时期进行灌溉都能促进产量的提升。模型模拟结果显示抽雄-灌浆期实施灌溉所取得的增产效果, 相比之下更为显著, 表明作物对这一阶段的水分胁迫有着更强烈的响应。平水年在抽雄-灌浆期灌溉时产量达到最大。这是因为平水年在抽雄-灌浆期出现水分胁迫, 但并不严重, 此时可以根据当年气象条件考虑是否灌溉。丰水年灌溉产量比雨养产量低, 因此不需要灌溉。

灌 2 水情况。特枯水年和枯水年, 在拔节-抽雄和抽雄-灌浆期各灌水 60 mm 时(方案 I_{18})产量最大, 且 E_{WU} 也达到最大。平水年, 苗期-拔节和抽雄-灌浆期各灌水 40 mm(方案 I_{14}), 此时产量最大, 其他在这两个生育期灌溉的方案, 如方案 I_{13} 、 I_{15} , 产量差别并不大。这些模拟结果都表明在玉米抽雄-灌浆期灌溉最能提高玉米产量, 与苗文芳等^[44]研究成果相似, 抽雄-灌浆期适度水分胁迫有利于提高产量和 E_{WU} 。

灌 3 水情况。特枯水年, 在苗期-拔节期灌水 20 mm、拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期各灌水 60 mm(方案 I_{32})时可获得最大产量, 但 E_{WU} 小于方案 I_{18} 获得的值。枯水年在苗期-拔节期、拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期各灌水 60 mm(方案 L_{21})获得 E_{WU} 最大值, 但产量没有方案 I_{18} 获得的产量高。与前人的研究结

果相符合, 如徐蕊等^[45]的研究结果为玉米产量与 E_{WU} 不具同步性, 较高的产量需要消耗更多的水分, 一定程度干旱可以得到较高的 E_{WU} , 但不利于产量提升。刘影等^[46]的研究认为作物生长过程中水分的减少导致其叶面积的减少, 叶片衰老加速, 光合作用降低, 降低作物叶源活性, 对结实率产生负面影响, 从而降低玉米产量。因此, 为了实现高产和节水的平衡, 需要在关键生长阶段提供适宜的灌水量, 确保玉米在拔节-抽雄期和抽雄-灌浆期内得到足够的水分^[47]。这样不仅能够实现高产, 还能有效提高 E_{WU} 。

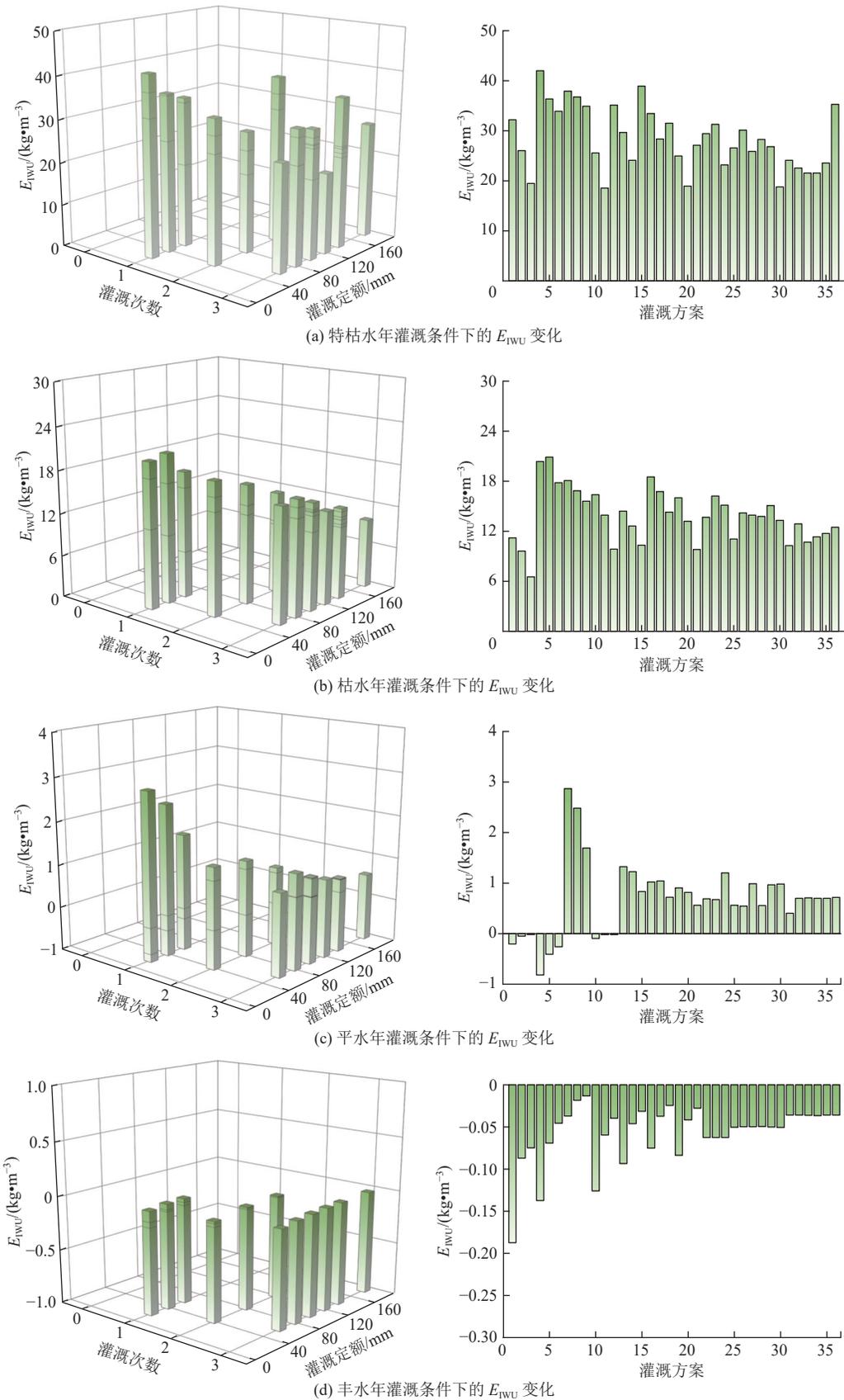
3.2 不同降水年类型最优灌溉方案

特枯水年、枯水年、平水年和丰水年, E_{WU} 最高时对应的产量分别占其最高产量 Y_{\max} 的 86.7%、99.9%、99.8% 和 100%, 而产量最高时所对应的 E_{WU} 分别占其 E_{WU} 最大值 $E_{WU\max}$ 的 99.5%、100%、99.6% 以及 99.9%。

本模拟研究共设置了 37 种不同的灌溉方案。鉴于不同降水年类型对灌溉需求的影响, 甄选出与之相匹配的最优化灌溉制度显得至关重要。由于农作物产量直接关系粮食安全问题, 因此在评估这些灌溉方案时, 产量成为首要考量的标准。特枯水年、枯水年、平水年和丰水年作物高产的筛选条件为: $Y_1 \geq 86.7\% Y_{1,\max}$ 、 $Y_2 \geq 99.9\% Y_{2,\max}$ 、 $Y_3 \geq 99.8\% Y_{3,\max}$ 、 $Y_4 \geq 100\% Y_{4,\max}$ ($Y_{1,\max}$ 、 $Y_{2,\max}$ 、 $Y_{3,\max}$ 、 $Y_{4,\max}$ 分别代表特枯水年、枯水年、平水年和丰水年灌溉获得的玉米最高产量)。

其次是水资源高效利用, 根据水分高效区间, 特枯水年、枯水年、平水年和丰水年资源高效利用的筛选条件为 $E_{WU1} \geq 99.5\% E_{WU1,\max}$ 、 $E_{WU2} \geq 100\% E_{WU2,\max}$ 、 $E_{WU3} \geq 99.6\% E_{WU3,\max}$ 、 $E_{WU4} \geq 99.9\% E_{WU4,\max}$ ($E_{WU1,\max}$ 、 $E_{WU2,\max}$ 、 $E_{WU3,\max}$ 、 $E_{WU4,\max}$ 分别代表特枯水年、枯水年、平水年和丰水年的 E_{WU} 最大值)。

综上所述, 特枯水年采用灌溉方案 I_{32} (20、60、60 mm)能够获得较高的产量和 E_{WU} , 产量和 E_{WU} 增幅分别 43%、41.5%; 枯水年采用灌溉方案 I_{18} (0、60、60 mm)能够获得较高的产量和 E_{WU} , 产量和 E_{WU} 增幅分别为 22%、20%; 在平水年灌溉产量和 E_{WU} 的增幅较小, 方案 I_9 较雨养条件下产量和 E_{WU} 仅提高 0.8%, 说明平水年可不灌溉; 丰水年在雨养条件下产量和 E_{WU} 最高, 这是降水已经满足玉米生育需求的原因。



注: 二维柱状图中灌溉方案为 1 代表方案 I_1 、2 代表方案 I_2 、...，以此类推。

图 5 不同降水年类型灌溉条件下的 E_{IWU} 变化

Fig. 5 Changes in E_{IWU} under irrigated conditions with different precipitation year types

3.3 不同降水年类型灌溉策略的建议

基于节水保产进行灌溉制度优化, 应根据不同

降水年类型进行差异化管理。特枯水年和枯水年, 需要在适当的农业管理策略下实施节水灌溉计划,

同时,根据 Srivastava 等^[48]研究,选择适当的播期也是提高作物 E_{WU} 的有效途径;平水年和丰水年,由于自然降水充足,可以不进行灌溉,这样可以节约水资源,同时减少因灌溉引起的环境问题。调整播种期,应根据气候变化趋势和土壤水分状况进行,以充分利用自然降水,降低灌溉需求,避免作物在生长关键期遭受干旱等极端气候事件。在确保农业水资源高效利用的基础上,实现产量与 E_{WU} 的协同提升,进而巩固粮食生产的稳定性。值得注意的是,近年来玉米产量的提升,除气候变化因素外,还归功于品种改良及化肥施用等多方面因素。因此,探究气候变化背景下未来玉米产量变动趋势,应从多维度入手,进行综合性分析与研究。

4 结论

本研究利用本地化修正的 AquaCrop 模型,针对松嫩平原地区不同降水年类型的雨养和灌溉情景,对玉米产量、 E_{WU} 和 E_{IWU} 进行了深入研究和分析,主要得出以下结果:

AquaCrop 模型模拟玉米 C_C 的 $R^2 \geq 0.99$ 、 $E_{RMS} \leq 2.5\%$ 、 $E_F \geq 0.99$,生物量的 $R^2 \geq 0.97$ 、 $E_{RMS} \leq 0.97\%$ 、 $E_F \geq 0.99$,产量的 $R^2 \geq 0.89$ 、 $E_{RMS} \leq 0.23\%$ 、 $E_F \geq 0.88$,表明模型在校准后能够较好地模拟玉米生长发育状况,具有较高的模拟精度,可用于模拟研究松嫩平原玉米产量以及 E_{WU} 。

灌溉对玉米的生长和产量至关重要。在关键生长阶段,适时适量的灌溉能确保作物获得足够的水分,缓解干旱引起的水分胁迫,减少产量损失提高 E_{WU} 。然而,产量与 E_{WU} 并非总是同步提升,随着产量增加,每单位水分产生的产量可能减少,导致 E_{WU} 降低。同时,不恰当的灌溉,如过度灌溉,会导致土壤水分过多,影响水分和养分吸收,导致作物产量和 E_{WU} 降低。

综合考虑产量和 E_{WU} ,在特枯水年,推荐苗期-拔节期(20 mm)、拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm)灌溉组合(方案 I_{32})为最优灌溉方案;在枯水年,推荐拔节-抽雄期(60 mm)和抽雄-灌浆期(60 mm)灌溉组合(方案 I_{18})为最优灌溉方案;在雨热同期地区,或者集中降水月份与作物生长关键期一致的地区,平水年和丰水年,不需要灌溉。

AquaCrop 模型能有效地模拟玉米生长发育,但对特定地区和品种适应性需改进。目前的灌溉估算未考虑实际操作中的损失,因此未来研究将加

强田间试验,优化模型,以提出更有效的灌溉策略。

参考文献:

- [1] MOK W K, YONG X T, WEI N C. Technology innovations for food security in Singapore: A case study of future food systems for an increasingly natural resource-scarce world[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102(1): 155-168. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.06.013.
- [2] 赵倩, 谢远云, 郝冬梅, 等. 松嫩平原中更新世以来气候干旱化: 来自哈尔滨黄土记录 [J]. *沉积学报*, 2022, 40(6): 1702-1717. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.054.
- [3] 周岳鹏, 倪红珍, 林希晨, 等. 联合降水关键影响因子的农业灌溉用水水价弹性研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(4): 108-115. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.04.009.
- [4] 张金良, 万德辉, 明广辉, 等. 塔里木河流域灌溉效率悖论成因实例研究 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 833-842. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0082.
- [5] 戎亚思, 李国强, 张杰, 等. 基于 AquaCrop 模型的河南省冬小麦灌溉制度优化研究 [J]. *河南农业科学*, 2023, 52(2): 151-161. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2023.02.017.
- [6] 彭书范, 吴学兵. 中国水资源承载力与农业高质量发展耦合协调研究 [J]. *人民长江*, 2023, 54(10): 52-59. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.008.
- [7] TODOROVIC M, ALBRIZIO R, ZIVOTIC L, et al. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 509-521. DOI: 10.2134/agronj2008.0166s.
- [8] 安静, 庞树江, 王小胜, 等. 基于供水风险的灌溉水资源多目标优化配置模型[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 100-111. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.010.
- [9] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: i. concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426-437. DOI: 10.2134/agronj2008.0139s.
- [10] GENEILLE E G, WANG Y M. Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment[J]. *Water*, 2016, 8(12): 557. DOI: 10.3390/w8120557.
- [11] WANG X X, WANG Q J, FAN J, 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. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.07.010.
- [12] MANIRUZZAMAN M, TALUKDER M S U, 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. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.06.022.
- [13] FARAHANI H J, IZZI G, OWEIS T Y. Parameterization and evaluation of the Aquacrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 469-476. DOI: 10.2134/agronj2008.0182s.
- [14] 吴宣毅, 佟玲, 康德奎, 等. 调亏灌溉对西北地区不同种植密度玉米耗水和产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(增刊 1): 59-67. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.007.
- [15] 巴前梅. 不同灌溉方式对青贮玉米生长、产量及饲料品质的影响 [J]. *中国饲料*, 2023(12): 93-96. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20231223.
- [16] 张铁楠, 付驰, 李晶, 等. 基于寒地春小麦 AquaCrop 与 WOFOST 模型适应性验证分析 [J]. *作物杂志*, 2013(3): 121-126. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2013.03.029.
- [17] 王连喜, 吴建生, 李琪, 等. AquaCrop 作物模型应用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1100-1106. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.10.1100.
- [18] 孙哲, 粟晓玲. 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. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwf.2021.10.018.
- [19] 张琳琳, 黄勤, 赵华甫, 等. 黑龙江省松嫩平原土地生态脆弱性时空特征分析 [J]. *土壤通报*, 2023, 54(3): 505-515. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022041603.
- [20] 王玉凤, 陈天宇, 付健, 等. 不同耕作方式对松嫩平原半干旱区玉米土壤生物特性影响 [J]. *玉米科学*, 2023, 31(3): 95-103. DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20230313.
- [21] WANG Y J, SHEN X J, JIANG M, et al. Vegetation change and its response to climate change between 2000 and 2016 in marshes of the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3569. DOI: 10.3390/su12093569.
- [22] 周晋军, 庞亚莉, 王昊, 等. 我国城市雨水资源化发展研究综述 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 61-74. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.006.
- [23] 常文娟, 梁忠民. AquaCrop 模型在农业旱灾损失评估中的应用 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(5): 175-178. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.05.039.
- [24] DOORENBOS J, KASSAM A H. Yield response to water [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, 1979. DOI: 10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2.
- [25] VANUYTRECHT E, RAES D, WILLEMS P. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 51(1): 323-332. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.10.017.
- [26] 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. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.03016.
- [27] ZHAO Y, MAO X M, SHUKLA M K, et al. Modeling soil water-heat dynamic changes in seed-maize fields under film mulching and deficit irrigation conditions[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1330. DOI: 10.3390/w12051330.
- [28] MENG F X, SUN Z M, DONG F L, et al. Spatiotemporal evolution of precipitation heterogeneity characteristics in the Heilongjiang Province from 1961 to 2020[J]. *Agronomy*, 2023, 13(12): 3057. DOI: 10.3390/agronomy13123057.
- [29] 冯峰, 姜楠, 冯跃华, 等. 三义寨引黄灌区主要作物需水量计算及趋势分析 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(9): 165-170. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.09.032.
- [30] 赵晗, 刘玉春, 吴迪, 等. 河北省 5 个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉需水特性分析 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 185-194. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0086.
- [31] 介飞龙, 费良军, 李山, 等. 基于根系层水分状态的旱区净灌溉需水量模型构建和应用 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 105-113. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2021453.
- [32] 杨雪婷, 曹永强, 李可欣, 等. 基于 SAPEI 的河北省玉米生育期旱涝演变特征 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 407-416. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0041.
- [33] 程伟, 丹利, 邓祥征, 等. 基于 CMIP6 历史和未来情景下的全球逐月大气 CO₂ 浓度数据集 [DS/OL]. <http://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=623c125b7e28172589a71fdb>, 2021-06-30.
- [34] 黎耀军. 2017—2019 年黑龙江省克山县喷灌玉米及马铃薯产量、品质及水分数据 [DS/OL]. <https://www.agridata.cn/data.html#/datadetail?id=291050>, 2023-01-18.
- [35] 王栋. 黑龙江省半干旱区玉米喷灌水肥耦合效应试

- 验研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [36] 陈帅宏. 黑龙江西部半干旱区玉米灌溉制度和水氮利用试验研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019
- [37] IQBAL M A, SHEN Y J, STRICEVIC R, et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 135: 61-72. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.12.012.
- [38] FENG D R, LI G Y, WANG D, et al. Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107372. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107372.
- [39] 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. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2019.07.02
- [40] HENG L, HSIAO T C, EVETT S, et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101: 488-498. DOI: 10.2134/agronj2008.0029xs.
- [41] AHMADI S H, MOSALLAEPOUR E, KAMGAR-HAGHIGHI A A, et al. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8): 2837-2853. DOI: 10.1007/s11269-015-0973-3.
- [42] MEBANE V J, DAY R L, HAMLETT J M, et al. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in pennsylvania[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(2): 419-427. DOI: 10.2134/agronj2012.0337.
- [43] 曹永强, 李玲慧, 路洁, 等. 辽宁省玉米水分生产率时空变化规律及影响因素 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 201-208. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0133.
- [44] 苗文芳, 陈素英, 邵立威, 等. 不同灌溉处理对夏玉米氮素吸收及转移的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 293-299. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.00293.
- [45] 徐蕊, 马国飞, 尚艳, 等. 小喇叭口至灌浆期水分胁迫对玉米产量和水分利用效率的影响 [J]. *节水灌溉*, 2022(10): 44-49. DOI: 10.12396/jsgg.2022.087.
- [46] 刘影, 关小康, 杨明达, 等. 基于 DSSAT 模型对豫北地区夏玉米灌溉制度的优化模拟 [J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5348-5358. DOI: 10.5846/stxb201808101706.
- [47] 张元红, 王瑞, 徐宗贵, 等. 不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种响应 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 136-144. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.22.015.
- [48] SRIVASTAVA R K, MEQUANINT F, CHAKRABORTY A, et al. Augmentation of maize yield by strategic adaptation to cope with climate change for a future period in Eastern India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: 130599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130599.

Simulation of maize yield and water use efficiency based on the AquaCrop model

TANG Bowen, MENG Fanxiang, MENG Bo, WANG Jin, FAN Yiming

(School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Sustainable water resource use and food security are fundamental to society's sustainability. Likewise, crop production is a prerequisite for guaranteeing food security. Heilongjiang Province is an essential commercial grain production base in China and has an important strategic position in ensuring national food security. It is located in one of the world's three major soil belts, recognized as the world's golden growth for maize. According to statistics, in 2021, the sown area of maize in Heilongjiang Province was about $652.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, accounting for 44.8% of the total sown area of grain in the province, and its output accounted for 37.7% of the national total maize production. The main planting areas of maize in the province are concentrated in the Qiqihar, Suihua, and Harbin regions, which are all in the Songnen Plain region of Heilongjiang Province. However, the region has undergone significant environmental changes due to the trend of aridification, and water scarcity is a severe problem that limits maize growth and development processes. In addition, numerous studies have shown that drought often occurs during the reproductive period of maize and that in dry years, maize production can be increased through scientifically sound irrigation measures, while in years of high-water availability, when precipitation can satisfy maize water demand, care needs to be taken to avoid over-irrigation that leads to wasted water resources and crop damage.

Based on 60 years of long-term historical meteorological data, the modified AquaCrop model was used to simulate maize yields under different rain-fed and irrigated scenarios for different precipitation year types at each typical site in the Songnen Plain. Water use efficiency and irrigation water use efficiency were further computed to assess the efficiency of water resource use under different precipitation year types. Finally, the data were spatially interpolated using ArcGIS, and the results were visualized as maps to better understand maize yield and water use in different regions.

The results show that in arid years, the irrigation combination of seedling stage - jointing (20 mm), jointing stage - pulling stage (60 mm), and pulling stage - filling stage (60 mm) was the best irrigation scheme. The yield of maize was 11.33 and 10.23 t/hm², and the average E_{WU} was 2.35 and 2.16 kg/m³, respectively. Irrigation can alleviate the effects of drought on yield. The optimal irrigation scheme in a typical water year was the soxion-filling period (60 mm). Still, the irrigation yield only increased by 0.1 t/hm², and the average E_{WU} only increased by 0.028 kg/m³. If the seedlings could emerge neatly, irrigation would not be allowed in an average water year. In wet years, precipitation can meet the water demand of maize without irrigation. For normal and wet years, rain-fed agriculture can obtain a similar yield to E_{WU} . Therefore, irrigation strategies should be differentiated according to hydrological years. Irrigation should not be done in wet years to save water resources, and adequate water should be required in dry years, especially in the key growth stages of maize during jointing-pumping, and pumping-filling. In addition, planting dates need to be adjusted to climate change trends to make the most of natural precipitation and reduce irrigation needs. Future studies should comprehensively consider the effects of climate change, soil moisture, and maize variety improvement to provide a theoretical basis for formulating a reasonable and effective maize irrigation system, coping with climate change and water shortage challenges, and ensuring food security.

Conclusion: The AquaCrop model can effectively simulate the growth process of maize in the Songnen Plain. During the critical growth stages of maize, timely and appropriate irrigation can ensure the crop receives sufficient water, reduce yield loss, and improve Water Use Efficiency (E_{WU}). However, over-irrigation can lead to a decrease in both. As yields increase, E_{WU} may decline because higher yields may require more water. In arid years, the optimal irrigation schemes are 20 mm from the seedling to the jointing stage, 60 mm from the jointing to the tasseling stage, and 60mm from the tasseling to the filling stage. In dry years, the optimal schemes are 60 mm during the jointing to tasseling stage and 60 mm during the tasseling to filling stage. Precipitation is sufficient in normal and wet years to meet the maize's water needs. No irrigation is required. This study can provide a theoretical basis for developing a more rational and effective maize irrigation system in the Songnen Plain of Heilongjiang Province, thereby better addressing the challenges of climate change and water scarcity and ensuring food security.

Key words: maize; AquaCrop model; yield; water use efficiency; irrigation water use efficiency

(上接第 1223 页)

within such pumps, offering guidance for their operation and maintenance under sandy conditions. The results indicate that to minimize erosion and enhance pump longevity, careful consideration of sediment parameters and operational head conditions is essential. By understanding the effects of these parameters, operators can optimize pump performance and reduce maintenance costs. This research contributes to optimizing pump design and operation, ensuring more reliable and efficient performance in sediment-laden environments. Future studies could further explore the development of erosion-resistant materials and coatings to enhance the durability of centrifugal pumps used in similar settings.

Key words: centrifugal pump; head condition; sediment mass concentration; sediment size; erosion characteristics