

郭尔静, 杨霏云, 伍露, 等. 基于 APSIM 的内蒙古突泉春玉米水氮管理措施. 应用气象学报, 2024, 35(5): 629-640.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240510

基于 APSIM 的内蒙古突泉春玉米水氮管理措施

郭尔静¹⁾ 杨霏云^{1)*} 伍露¹⁾ 孙爽²⁾ 高家宝³⁾ 张超群³⁾ 张玲³⁾

¹⁾ (中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

²⁾ (中国气象科学研究院, 北京 100081)

³⁾ (内蒙古自治区兴安盟突泉县气象局, 兴安盟 137500)

摘要

水分和氮肥是制约旱地农业生产的重要因素。基于 2013—2022 年内蒙古自治区突泉春玉米发育期、单产和田间管理数据, 对农业生产系统模型 (agricultural production system simulator, APSIM) 调参验证; 基于验证后的模型, 结合 1981—2022 年突泉气象数据, 设计不同水分亏缺程度下水氮管理情景, 以春玉米单产、水氮用量和效率为指标, 提出春玉米最优水氮管理措施, 并分析不同降水年型下春玉米适宜灌溉量和施氮量。结果表明: APSIM 对春玉米出苗-开花日数、出苗-成熟日数和单产模拟值与实测值的归一化均方根误差分别为 1.3%、1.2% 和 2.8%, APSIM 可定量模拟春玉米发育期和单产。综合春玉米单产、灌溉量、施氮量、水分生产力和氮肥农学效率, 最优管理措施为 0~100 cm 土壤剖面深度下水分亏缺程度为 60% 时补充灌溉, 灌溉量为 171.0 mm, 施氮量为 197.8 kg·hm⁻²。当春玉米生长季降水量为 200~400、401~600 mm 和 601~800 mm 时, 适宜的灌溉量分别为 233.0~283.5、110.5~148.4 mm 和 125.0~155.0 mm, 施氮量分别为 176.9~219.3、218.3~241.5 kg·hm⁻² 和 211.8~249.9 kg·hm⁻²。

关键词: 春玉米; 单产; 水分生产力; 氮肥农学效率; 水氮管理措施

引言

玉米在全球种植广泛, 是重要的粮食经济作物之一。我国玉米种植面积和产量均占粮食作物的三分之一左右, 在粮食安全中占有重要地位^[1-3]。调整优化水肥管理措施是应对各种不利因素影响、提升作物单产最直接且最易实现的方式之一^[4-8]。全球气候变化导致降水区域差异及年际差异较大, 不同降水年型下玉米适宜水氮管理措施差异明显, 亟需寻求优化的水氮精准管理决策方案^[9-11]。与田间试验周期长和统计方法不考虑作物生理过程相比, 作物模型具有考虑作物生长动态且可重复性高的特点, 因此已成为管理措施对作物影响评估的有效方法^[12-14]。北美、欧洲和澳大利亚等农业发达地区广泛应用作物模型进行农田水肥管理优化^[15-16]。

已有研究在不同区域尺度上探讨水分和氮肥管理对于玉米产量的影响, 基于玉米丰产、高效等目标制定水氮管理措施^[17]。赵建华等^[18]基于田间试验发现河西走廊灌水量为 330~450 mm、施氮量为 150~225 kg·hm⁻² 可使制种玉米产量、水分生产力和氮利用效率分别提升 13%、20% 和 32%。周奇等^[19]基于大田正交试验确定了西北旱区膜下滴灌条件下灌水下限、纯氮施用量和种植密度对玉米产量等指标的影响次序及各因素水平的最佳搭配。李晶晶等^[20]探究东北半湿润区喷灌水肥一体化条件下春玉米最佳施氮管理模式。关凯心等^[21]采用 APSIM (agricultural production system simulator, 农业生产系统模型) 明确了华北冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式智慧应对气候变化的水氮管理措施。作物对水分与氮素的实际需求是水氮管理优化的基础, 并与气候条件和土壤养分相关, 存在空间和时

2024-05-16 收到, 2024-07-30 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局气象干部培训学院科研项目 (2023CMATCZDA03)

* 通信作者, 邮箱: yangfy@cma.gov.cn

间异质性^[22-23]。上述试验与模拟结果可为玉米水氮管理提供参考,但精准的水氮调控需要结合土壤水分亏缺程度确定灌溉时间、灌溉量,并以水调肥,优化氮肥用量,提高氮肥利用效率和作物产量。已有研究结合机器学习方法,构建作物精准施肥控制系统^[24],但其机理性和普适性仍有待提高。作物模型可以实现农田生态系统水分与养分过程的动态模拟以及作物生长对环境适用性的定量研究,可以解决水氮精准调控机理性和普适性的问题,较田间试验方法更节省经济和时间成本。

鉴于此,本研究收集2013—2022年内蒙古自治区突泉春玉米发育期、单产和田间管理数据,对AP-SIM关键参数进行调参验证,并评估模型的模拟效果。利用1981—2022年突泉气象数据,设计不同水分亏缺程度下多种管理情景,以春玉米的高产稳产、

水氮施用量和水氮利用效率为指标,确定适合当地春玉米的最优水氮管理措施,为优化当地春玉米生产管理提供理论基础和技术支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于内蒙古自治区兴安盟中部突泉农业气象观测站(45.2°N,121.3°E)。突泉属温带大陆季风性气候,以一年一熟耕作制度为主。1981—2022年该站春玉米生长季5—9月降水量为363 mm,占全年降水量的90%以上,但不同年份、不同月份降水量差异较大;5—9月日平均太阳辐射为16.2~20.2 MJ,日平均最高气温为22.2~28.6℃,日平均最低气温为8.9~18.1℃(图1)。

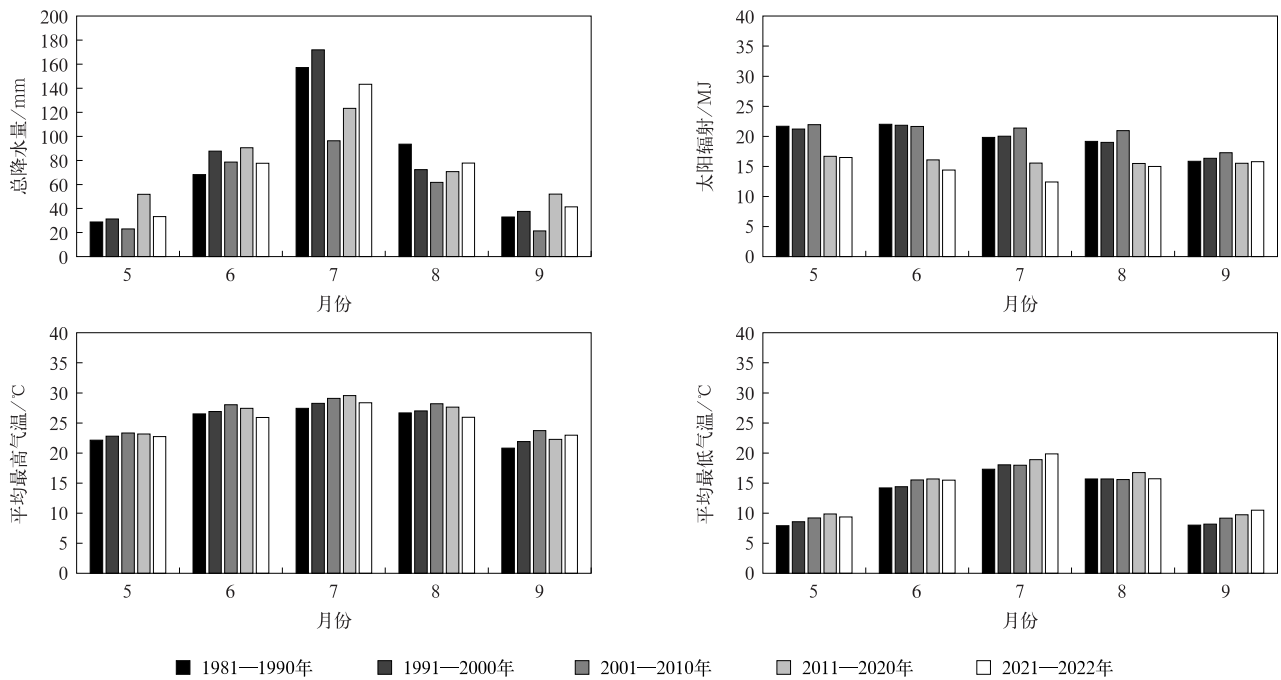


图1 1981—2022年内蒙古自治区突泉农业气象观测站气候资源

Fig. 1 Climate resources at Tuquan Agrometeorological Observation Station of Inner Mongolia from 1981 to 2022

1.2 数据

气象数据包括1981—2022年内蒙古自治区兴安盟突泉农业气象观测站逐日最高气温、最低气温、降水量、日照时数、风速和相对湿度等气象要素,气象站与农业气象观测站为同一站点。AP-SIM驱动的土壤养分模块数据来源于农业气象观测站田间观测,包括pH值为8.89,有机质含量为11.6 g·kg⁻¹,全氮含量为0.73 g·kg⁻¹。AP-SIM驱动的

土壤水分模块数据来源于中国科学院南京土壤所10 km×10 km格点数据,以研究站所在格点的均一化土壤理化特性数据作为AP-SIM土壤模块的驱动数据,包括分层的田间持水量、凋萎湿度、饱和含水量、容重及土壤导水率等指标。

作物数据及田间管理数据来自2013—2022年内蒙古自治区兴安盟突泉农业气象观测站,包括春玉米品种(丰垦008)、播种日期(4月29日—5月14

日)、播种密度(每公顷 7.5 万株),发育期(出苗期、开花期和成熟期),单产、施肥时间和施肥量以及灌溉时间和灌溉量,数据完备。2013—2015 年试验数据作为 APSIM 调参数据集,2016—2022 年试验数据作为 APSIM 验证数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 农业生产系统模型

APSIM 是澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统研究组共同研制开发的作物生产模拟系统^[25-26]。目前,APSIM 在世界多个国家及地区的气候变化评估、农业环境影响评价、农业生产管理决策、水资源合理利用等方面得到广泛应用^[12,21,27-29]。APSIM 克服了传统试验的时空局限性、研究对象的单一性、试验周期长等缺点,该模型具有模块化的特点,通过中央引擎将各模块结合在一起,在进行作物模拟时主要用到的模块是气象模块、作物模块、地表有机质模块、土壤模块、管理模块、施肥模块、灌溉模块和结果输出模块^[25-26]。APSIM-maize V7.9 可以动态量化模拟春玉米生长发育过程,调用模型系统的控制模块(时间、管理和输出模块)、管理模块(灌溉和施肥模块)、玉米生长模块、气候模块和土壤模块(土壤水和土壤氮模块)^[12,21]。

1.3.2 模型适用性评价指标

通过对比模型模拟结果与实测结果以及各项评价指标检验 APSIM 模拟突泉春玉米发育期和单产准确性。利用线性回归决定系数(R^2)、均方根误差和归一化均方根误差评价模型模拟效果,其中 R^2 反映模型模拟值与实测值的一致性,数值越接近 1 表明模型模拟效果越好;均方根误差和归一化均方根误差分别反映模型模拟值与实测值相比的绝对误差和相对误差,归一化均方根误差为均方根误差占样本平均实测值的百分比,数值越小表明模型模拟效果越准确可靠^[11,29]。

1.3.3 模拟情景设置

模型中 1981—2022 年播期采用实际播期。播种密度按农业气象观测站所在地常规水平每公顷 7.5 万株设置。施肥设置为在各土壤干旱条件下,当根层速效氮含量小于 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时模型开启自动施肥,肥料施用类型为 NO_3^- ,至其含量上限时 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 停止施肥。

自动灌溉模拟情景考虑因素包括土壤剖面深度和土壤干旱程度,土壤剖面深度设置 3 个梯度,土壤

干旱程度设置 6 个梯度,共计 18 个模拟情景。土壤剖面深度设置 3 个梯度,分别为 0~200 cm 土层干旱缺水、0~100 cm 土层干旱缺水和 0~60 cm 土层干旱缺水;土壤干旱程度由土壤水分亏缺程度表示,设置 6 个梯度,当土壤水分亏缺程度分别为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 时,模型开启自动灌溉,灌溉至该深度土壤剖面土壤水分亏缺程度为 0 时停止。APSIM 根据不同土层的田间持水量、凋萎湿度和土壤含水量计算土壤的水分亏缺程度^[25]。

1.3.4 高稳系数

高稳系数(high stability coefficient)由温振民等^[30]首先提出,该系数综合反映作物产量的高产性和稳产性,系数越高,表明作物高产性和稳产性越好,广泛应用于作物产量评估^[31]。本文通过高稳系数分析春玉米在不同水氮管理措施下产量的高产性与稳产性,得到适宜该地区春玉米的水氮管理措施。

1.3.5 水分生产力和氮肥农学效率

采用水分生产力^[32]和氮肥农学效率^[33]表征作物生产过程中的水分生产力和氮肥资源效率。水分生产力指在一定作物品种和耕作栽培条件下,单位水资源量(降水量和灌溉量)所获得的单位面积产量(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)。氮肥农学效率是单位施氮量获得的作物单位面积产量增量(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.3.6 分析方法

采用 SPSS 26.0 分析数据显著性,若数据符合正态分布,则采用 Duncan 方法比较不同处理的显著性差异^[34];若不符合正态分布,则采用非参数检验(Kruskal-Wallis test)分析不同因素显著性^[35]。

2 内蒙古突泉春玉米水氮管理措施

2.1 模型适用性评价

使用 APSIM 模拟前需将模型参数本地化,参数包括玉米各品种从出苗到营养生长期结束的积温、开花到灌浆的积温、光周期斜率、每株最大籽粒数、灌浆速率等(表 1)。将各站的气象数据、土壤数据及作物数据输入模型后,对参数进行调参验证。本文采取试错法对研究站春玉米品种参数进行调整验证,使模拟值与实测值尽可能接近,使 APSIM 本地化。发育期方面,主要针对玉米的开花期及成熟期进行模拟值和实测值比较;产量方面,主要比较单

产模拟值和实测值(图 2)。

由图 2 可知, APSIM 模拟春玉米出苗-开花日数和出苗-成熟日数的均方根误差分别为 0.9 d 和 1.4 d, 归一化均方根误差分别为 1.3% 和 1.2%, 说明 APSIM 模拟春玉米发育期的精度较高; 模拟的春

玉米单产均方根误差为 $235.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 归一化均方根误差为 2.8%, 说明 APSIM 模拟春玉米单产的精度也较高。综上所述, APSIM 可以较准确反映春玉米发育期和单产, 可以应用于不同水氮管理措施情景模拟。

表 1 调整后 APSIM 关键参数值

Table 1 Specific values of APSIM key parameters after parameter adjustment		
描述	单位	参数值
出苗到拔节期结束的有效积温	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	210
孕穗期到开花的有效积温	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	10
开花到灌浆的有效积温	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	10
开花到成熟的有效积温	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	730
最适光周期	h	12.5
光周期最大临界值	h	24.0
光周期斜率	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$	0.0
每株最大籽粒数		650
每平方米茎秆重	g	120
植株高度	mm	3000

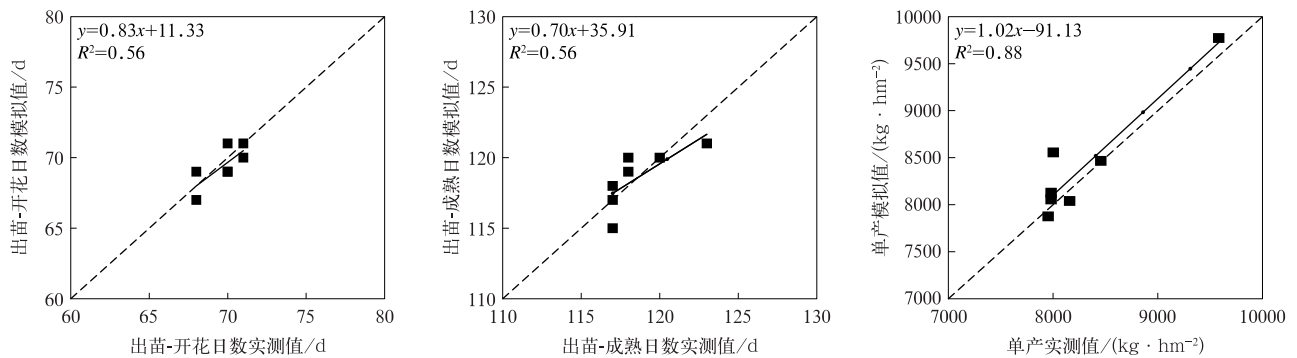


图 2 2016—2022 年春玉米发育期日数和单产的模拟值与实测值比较

Fig. 2 Comparison and validation of simulated and observed growth duration and yield of spring maize from 2016 to 2022

2.2 不同情景下春玉米单产差异

由图 3 可知, 3 个土壤剖面深度下春玉米单产由高到低依次为 0~60 cm、0~100 cm、0~200 cm, 且在同一土壤剖面深度下, 春玉米平均单产和高稳系数随土壤水分亏缺程度增加而降低。结合表 2 可知, 对于自动灌溉情景下 0~200 cm 土壤剖面深度, 当土壤水分亏缺程度为 40%、50% 和 60% 时启动灌溉, 春玉米平均单产分别较土壤水分亏缺程度为 10% 时启动灌溉显著降低 24.8%、36.3% 和 48.9% (达到 0.05 显著性水平)。对于自动灌溉情景下 0~100 cm 和 0~60 cm 土壤剖面深度, 当土壤水分亏缺程度为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 时春玉米平均单产无显著差异。同时, 对于自动灌溉

情景下 0~100 cm 和 0~60 cm 土壤剖面深度, 当土壤水分亏缺程度为 10%、20%、30% 和 40% 启动自动灌溉, 春玉米单产高稳系数高于 0.75, 说明土壤水分亏缺程度低于 40% 时启动自动灌溉, 可以保证春玉米的高产稳产。以高稳系数大于 0.75 为指标, 筛选出的灌溉情景为 0~200 cm 土壤剖面深度下水分亏缺程度为 10%, 0~100 cm 土壤剖面深度下水分亏缺程度为 10%、20%、30%、40%, 0~60 cm 土壤剖面深度下水分亏缺程度为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60%, 且最优灌溉情景为 0~60 cm 土壤剖面深度下水分亏缺程度为 10% 时启动自动灌溉(单产分别为 $13292.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高稳系数为 0.83)。

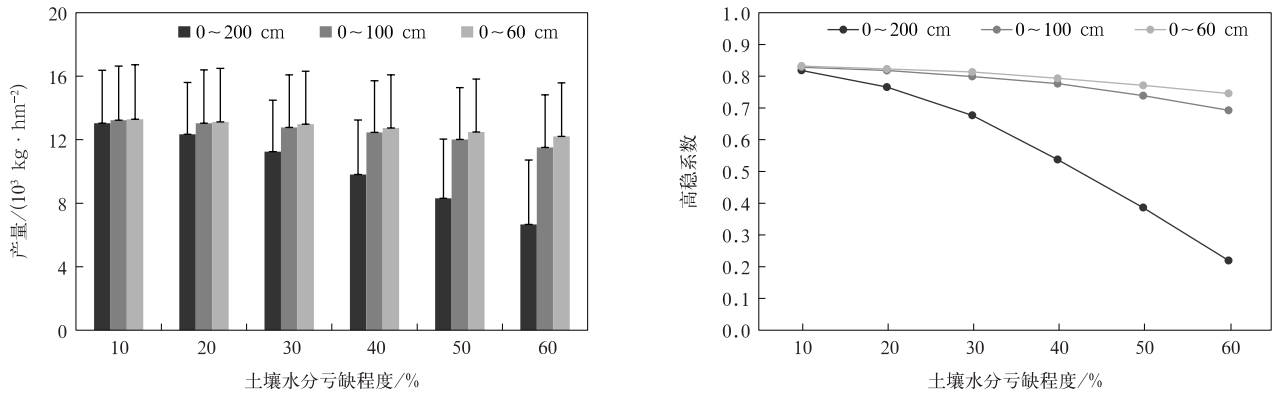


图3 不同情景下春玉米平均单产和高稳系数

Fig. 3 Average yield and high stability coefficient of spring maize under different scenarios

表2 不同情景下春玉米单产、水分生产力和氮肥农学效率的差异

Table 2 Variations in spring maize yield, water productivity and agronomic efficiency of applied nitrogen under different scenarios

土壤剖面深度/cm	土壤水分亏缺程度/%	单产/ (kg·hm ⁻²)	高稳系数	灌溉量/ mm	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	水分生产力/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)
0~200	10	13035.2	0.82	319.8	293.5	16.4	22.0
	20	12343.3	0.77	219.3*	214.1*	18.2	26.2
	30	11252.9	0.68	170.2*	189.5*	18.2	26.5
	40	9807.3*	0.54	131.2*	154.8*	17.0	26.8*
	50	8307.9*	0.39	94.1*	137.7*	15.5	24.6
	60	6661.1*	0.22	58.3*	112.4*	13.1*	23.2
0~100	10	13230.2	0.83	358.3	317.8	15.7	19.8
	20	13044.2	0.82	279.8*	279.3	17.4	22.7
	30	12777.1	0.80	242.4*	247.1*	18.1	24.8*
	40	12458.1	0.78	214.6*	224.7*	18.6	25.3*
	50	12016.8	0.74	193.2*	217.2*	18.6	25.8*
	60	11519.0	0.69	171.0*	197.8*	18.6	24.8*
0~60	10	13292.6	0.83	379.8	335.1	15.3	18.6
	20	13122.6	0.82	301.5*	279.4*	16.9	22.3
	30	12974.9	0.81	264.1*	262.4*	17.8	23.9*
	40	12744.2	0.79	241.0*	249.7*	18.1*	24.7*
	50	12483.6	0.77	218.8*	241.9*	18.4*	24.8*
	60	12210.3	0.75	206.1*	226.6*	18.4*	24.2*

注: * 表示与同一土壤剖面深度下土壤水分亏缺程度为10%情景的差异达到0.05显著性水平。

2.3 不同情景下春玉米水氮利用效率差异

比较不同情景下的灌溉量的差异。由图4可知,自动灌溉情景下,3个土壤剖面深度下的春玉米灌溉量由高到低依次为0~60 cm、0~100 cm、0~200 cm,且在同一土壤剖面深度下,春玉米灌溉量随土壤水分亏缺程度增加而增加。结合表2可知,对于自动灌溉情景下0~200 cm土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米灌溉量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少31.4%、46.8%、59.0%、70.6%和81.8%(达到0.05显著性水平)。

对于自动灌溉情景下0~100 cm土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米灌溉量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少21.9%、32.3%、40.1%、46.1%和52.3%(达到0.05显著性水平)。对于自动灌溉情景下0~60 cm土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米灌溉量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少20.6%、30.4%、36.5%、42.4%和45.7%(达到0.05显著性水平)。

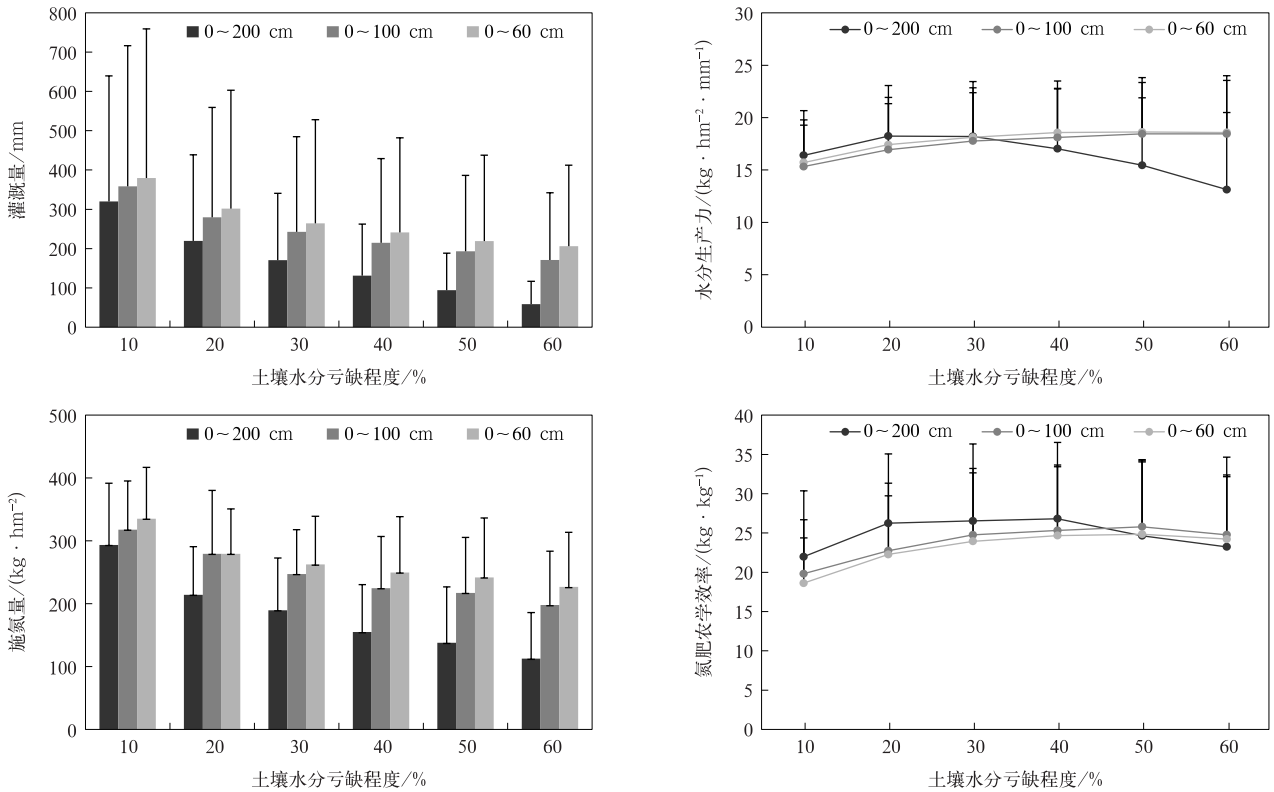


图4 不同情景下春玉米水分生产力和氮肥农学效率

Fig. 4 Spring maize water productivity and agronomic efficiency of applied nitrogen under different scenarios

基于 APSIM 的春玉米单产和灌溉量模拟结果,结合春玉米生长季降水量,计算春玉米水分生产力。由图4和表2可以看到,对于自动灌溉情景下0~200 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为50%和60%时启动自动灌溉,春玉米水分生产力较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别降低5.8%和19.9%。对于自动灌溉情景下0~100 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米水分生产力较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别提高18.3%、18.5%和18.2%。对于自动灌溉情景下0~60 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米水分生产力较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别提高18.1%、20.4%和20.4%。基于不同情景下春玉米水分生产力的差异,可以发现0~200 cm 土壤剖面深度下最优灌溉情景为土壤水分亏缺程度为20%~30%时启动自动灌溉,0~100 cm 和0~60 cm 土壤剖面深度下最优灌溉情景为土壤水分亏缺程度为40%~60%时启动自动灌溉。综合不同情景,以

水分生产力最高为目标的最优灌溉措施为0~100 cm 土壤剖面深度土壤水分亏缺程度为40%~60%时启动自动灌溉(水分生产力为 $18.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)。

由图4可知,自动灌溉情景下3个土壤剖面深度的春玉米施氮量的变化趋势与灌溉量一致。结合表2可知,对于自动灌溉情景下0~200 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米施氮量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少27.1%、35.5%、47.3%、53.1%和61.7%达到0.05显著性水平。对于自动灌溉情景下0~100 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米施氮量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少22.2%、29.3%、31.6%和37.8%(达到0.05显著性水平)。对于自动灌溉情景下0~60 cm 土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%时启动自动灌溉,春玉米施氮量较土壤水分亏缺程度为10%时启动自动灌溉分别减少16.6%、21.7%、

25.5%、27.8%和32.4%(达到0.05显著性水平)。

基于 APSIM 输出的春玉米单产和施氮量,计算春玉米氮肥农学效率。由图4和表2可以看到,在同一土壤剖面深度下,春玉米氮肥农学效率随水分亏缺程度增加呈先升后降趋势。对于自动灌溉情景下0~200 cm土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为40%时启动自动灌溉,春玉米氮肥农学效率最高,达到26.8 kg·kg⁻¹。对于自动灌溉情景下0~100 cm和0~60 cm土壤剖面深度,土壤水分亏缺程度为50%时启动自动灌溉,春玉米氮肥农学效率最高,分别达到25.8 kg·kg⁻¹和24.8 kg·kg⁻¹。

2.4 春玉米最优水氮管理措施

比较春玉米单产、水分生产力和氮肥农学效率差异,以春玉米单产、水分生产力和氮肥农学效率与所有处理最大值相比不显著降低为原则,筛选出11个无显著差异的模拟情景,分别为0~200 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为20%,0~100 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%,0~60 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为20%、30%、40%、50%和60%。在上述情景中,以

灌溉量最低为目标的最优灌溉措施为0~100 cm土壤剖面深度土壤水分亏缺程度为60%时启动自动灌溉,该情景下灌溉量为171.0 mm,且施氮量也最低,为197.8 kg·hm⁻²。此外,0~100 cm土壤剖面深度水分亏缺程度为40%、50%和0~60 cm土壤剖面深度水分亏缺程度为60%的灌溉量和施氮量与0~100 cm土壤剖面深度水分亏缺程度为60%无显著差异。

结合春玉米生长季降水量,分析最优管理措施(0~100 cm土壤剖面深度水分亏缺程度为40%、50%、60%,0~60 cm土壤剖面深度水分亏缺程度为60%时启动自动灌溉)下春玉米的灌溉量和施氮量。由表3和表4可知,当春玉米生长季降水量为200~400 mm时,适宜的灌溉量为233.0~283.5 mm,施氮量为176.9~219.3 kg·hm⁻²;当春玉米生长季降水量为401~600 mm时,适宜的灌溉量为110.5~148.4 mm,施氮量为218.3~241.5 kg·hm⁻²;当春玉米生长季降水量为601~800 mm时,适宜的灌溉量为125.0~155.0 mm,施氮量为211.8~249.9 kg·hm⁻²。

表3 最优管理措施下不同降水年型春玉米灌溉量(单位:mm)

降水量/mm	0~100 cm 土壤剖面深度			0~60 cm 土壤剖面深度
	水分亏缺程度为40%	水分亏缺程度为50%	水分亏缺程度为60%	水分亏缺程度为60%
200~400	283.5	261.0	233.0	279.0
401~600	148.4	126.8	110.5	137.4
601~800	155.0	145.0	125.0	130.0

表4 最优管理措施下不同降水年型春玉米施氮量(单位:kg·hm⁻²)

Table 4 Nitrogen application amount of spring maize for different precipitation year types under optimal managements(unit:kg·hm⁻²)

降水量/mm	0~100 cm 土壤剖面深度			0~60 cm 土壤剖面深度为
	水分亏缺程度40%	水分亏缺程度为50%	水分亏缺程度为60%	水分亏缺程度为60%
200~400	219.3	198.9	176.9	210.2
401~600	230.3	237.0	218.3	241.5
601~800	225.1	211.7	211.8	249.9

3 结论与讨论

本研究收集2013—2022年内蒙古自治区兴安盟突泉农业气象观测站春玉米发育期、单产和田间管理数据,对 APSIM 关键参数调参验证;基于验证后的模型,结合1981—2022年突泉气象数据,设计

不同水分亏缺程度下水氮管理情景,以春玉米单产、灌溉量、施氮量、水分生产力和氮肥农学效率为指标,提出春玉米最优水氮管理措施,分析不同降水年型下春玉米适宜的灌溉量和施氮量。主要结论如下:

1) 以春玉米单产、水分生产力和氮肥农学效率与所有处理最大值相比不显著降低,且灌溉量和施

氮量与所有处理最小值相比不显著增加为原则,筛选4个无显著差异的管理措施,分别为0~100 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为40%、50%、60%和0~60 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为60%时启动自动灌溉。其中,0~100 cm土壤剖面深度下水分亏缺程度为60%启动自动灌溉情景下灌溉量最低,为171.0 mm;施氮量也最低,为197.8 kg·hm⁻²。

2) 当春玉米生长季降水量为200~400 mm时,适宜的灌溉量为233.0~283.5 mm,施氮量为176.9~219.3 kg·hm⁻²;当春玉米生长季降水量为401~600 mm时,适宜的灌溉量为110.5~148.4 mm,施氮量为218.3~241.5 kg·hm⁻²;当春玉米生长季降水量为601~800 mm时,适宜的灌溉量为125.0~155.0 mm,施氮量为211.8~249.9 kg·hm⁻²。

旱地农业水资源亏缺和施肥效益低的问题受到广泛关注,重点是实现以肥调水、以水促肥,提高水分利用效率;水肥耦合技术已被视为旱地农业生产的重要措施。目前作物水氮管理措施优化多采用田间试验方法研究^[7,36],但田间试验结果的推广受限于试验地点、年限和试验设计,且耗时耗力,难以推广。本研究基于机理模型提出1981—2022年不同降水年型下春玉米最优水氮管理措施,补充了前人研究的不足。已有基于作物模型的春玉米水氮管理措施优化的研究多将水分和氮肥视为独立因素,但水分和氮肥两者间存在竞争协同机制,水和氮与作物产量在一定范围内呈正相关,表现为水氮协同效应,然而水氮过量会导致协同效应消减甚至出现产量与水氮负相关,因此本文设计了不同于旱程度下的多种水氮协同管理情景。同时,本研究基于验证后的APSIM机理模型动态监测春玉米生长过程中土壤水分和氮肥亏缺程度,实时按需补充水分和氮肥,管理措施更数字化和智慧化。本研究以作物单产、水分生产力、氮肥农学效率、灌溉量和施氮量等指标筛选最优的水氮管理措施。研究发现自动灌溉情景下,随着灌溉深度的增加,水分亏缺程度对春玉米单产影响减小;灌溉深度至少在1 m以上,春玉米单产才不会随土壤水分亏缺程度变化而显著变化,这与朱丽等^[37]研究结果一致。此外,王晓云等^[38]研究表明,适度亏缺灌溉有利于作物保产节水减排,有助水分利用效率和氮肥利用效率的改善,与本文研究结果一致。突泉高标准农田建设的灌溉措施为实时监测土壤水分亏缺程度达到50%进行灌溉,与APSIM探索的最优管理措施一致。气候变

化背景下干旱等气象灾害风险频发重发^[39],旱地农业水氮关系研究不仅仅要考虑作物产量、水分利用效率,更多应该关注集约化灌溉农田的水氮环境及其精准调控问题,本研究为作物机理模型在作物水氮实时监测诊断以及精准管理等方面的应用提供科学参考。实际生产中,可依据当地气象年景预测和降水预报,结合玉米长势和土壤墒情监测采用APSIM进行实时动态模拟和水氮管理措施评估。

本研究的不足之处:①本研究采取试错法对研究站点春玉米品种参数进行调整验证,虽然调参验证后的APSIM模拟春玉米发育期和单产的精度较高,但未对不同管理措施下的生物量、叶面积动态等过程调参验证,仍可能存在多参同效现象,未来可结合机器学习等方法改进模型调参验证过程和精度^[40]。②本研究仅在站点尺度上分析了1981—2022年突泉春玉米最优水氮管理措施,下一步可结合未来气候情景数据、土壤数据和GIS手段^[41-43],解析未来不同气候情景下区域尺度上的春玉米水氮管理措施。③本研究仅采用当地的实际品种,未来的研究中可以探索不同玉米品种水氮需求的差异,此外还可以探索播期变化^[44]和秸秆还田^[45]等对适宜水氮管理的影响。④未来对于不同目标的综合评估还可以考虑其他指标或评估方法,如进一步结合碳排放^[46]或生产投入成本和收益等目标探讨春玉米高产高效低排经济的水氮一体化管理措施,以统筹春玉米高产稳产和高效低碳生产。

参考文献

- [1] Li E, Zhao J, Pullens J W M, et al. The compound effects of drought and high temperature stresses will be the main constraints on maize yield in Northeast China. *Sci Total Environ*, 2022, 812. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.152461.
- [2] 陈雨焯, 王培娟, 张源达, 等. 基于3种遥感指数的东北春玉米干旱识别对比. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 466-476.
Chen Y Y, Wang P J, Zhang Y D, et al. Comparison of drought recognition of spring maize in Northeast China based on 3 remote sensing indices. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 466-476.
- [3] 霍治国, 张海燕, 李春晖, 等. 中国玉米高温热害研究进展. *应用气象学报*, 2023, 34(1): 1-14.
Huo Z G, Zhang H Y, Li C H, et al. Review on high temperature heat damage of maize in China. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 1-14.
- [4] 毛振强, 张银锁, 宇振荣. 基于作物生长模型的夏玉米灌溉需求分析. *作物学报*, 2003, 29(3): 419-426.
Mao Z Q, Zhang Y S, Yu Z R. Water requirement and irriga-

- tion scenarios of summer maize production aided by crop growth simulation model. *Acta Agron Sinica*, 2003, 29(3): 419-426.
- [5] 陈东峰, 罗朋, 张富仓, 等. 膜下滴灌水肥调控对玉米生长和水肥利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 161-168.
Chen D F, Luo P, Zhang F C, et al. Effects of irrigation and fertilization regulation on maize growth, water and nutrient use of drip irrigation under plastic film. *Agric Res Arid Areas*, 2018, 36(5): 161-168.
- [6] 陈世超, 刘文丰, 杜太生. 基于水氮管理与种植结构优化的作物丰产高效管理策略. *农业工程学报*, 2022, 38(16): 144-152.
Chen S C, Liu W F, Du T S. Achieving high-yield and high-efficient management strategy based on optimized irrigation and nitrogen fertilization management and planting structure. *Trans Chinese Soc Agric Eng*, 2022, 38(16): 144-152.
- [7] 党建友, 裴雪霞, 张定一, 等. 微喷灌水氮一体化对冬小麦生长发育和水肥利用效率的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3700-3710.
Dang J Y, Pei X X, Zhang D Y, et al. Effects of integration of micro-sprinkler irrigation and nitrogen on growth and development of winter wheat and water and fertilizer use efficiency. *Chinese J Appl Ecol*, 2020, 31(11): 3700-3710.
- [8] 赵国强, 朱自玺, 邓天宏, 等. 水分和氮肥对冬小麦产量的影响及其调控技术. *应用气象学报*, 1999, 10(3): 314-320.
Zhao G Q, Zhu Z X, Deng T H, et al. The influences of water and nitrogenous fertilizer on winter wheat yield and the controlling technique. *J Appl Meteor Sci*, 1999, 10(3): 314-320.
- [9] 刘富强, 窦超银, 顾桂栋, 等. 风沙土水肥一体化滴灌水量对玉米生长和产量的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(5): 110-116.
Liu F Q, Dou C Y, Gu G D, et al. Impacts of water and fertilizer drip irrigation on growth and yield of maize in windy sandy soil. *Jiangsu Agric Sci*, 2023, 51(5): 110-116.
- [10] Lobell D B, Hammer G L, McLean G, et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Clim Change*, 2013, 3(5): 497-501.
- [11] 王凤仙, 陈研, 李韵珠. 土壤水氮资源的利用与管理Ⅲ. 冬小麦夏玉米水氮管理措施的优化. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 18-23.
Wang F X, Chen Y, Li Y Z. Use and management of soil water and nitrogen resources Ⅲ. The optimal management of soil water and nitrogen resources. *Plant Nutrition Fertil Sci*, 2000, 6(1): 18-23.
- [12] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 157-164.
Dong C Y, Liu Z J, Yang X G. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in northern China. *Trans Chinese Soc Agric Eng*, 2015, 31(11): 157-164.
- [13] 刘志娟, 杨晓光, 王静, 等. APSIM 玉米模型在东北地区的适应性. *作物学报*, 2012, 38(4): 740-746.
Liu Z J, Yang X G, Wang J, et al. Adaptability of APSIM maize model in Northeast China. *Acta Agron Sinica*, 2012, 38(4): 740-746.
- [14] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务技术进展. *应用气象学报*, 2018, 29(6): 641-656.
Hou Y Y, Zhang L, Wu M X, et al. Advances of modern agrometeorological service and technology in China. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(6): 641-656.
- [15] 王文佳, 冯浩. 国外主要作物模型研究进展与存在问题. *节水灌溉*, 2012(8): 63-68.
Wang W J, Feng H. The progress and problems in the development of foreign crop models. *Water Sav Irrig*, 2012(8): 63-68.
- [16] 史源, 李益农, 白美健, 等. DSSAT 作物模型进展以及在农田水管理中的应用研究. *中国农村水利水电*, 2015(1): 15-19.
Shi Y, Li Y N, Bai M J, et al. Research on the development and application of DSSAT cropping system model in water management and irrigation. *China Rural Water Hydropower*, 2015(1): 15-19.
- [17] Ran H, Kang S Z, Li F S, et al. Responses of water productivity to irrigation and N supply for hybrid maize seed production in an arid region of Northwest China. *J Arid Land*, 2017, 9(4): 504-514.
- [18] 赵建华. 河西绿洲灌区制种玉米种子生产的水氮效应. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
Zhao J H. Effects of Water and Nitrogen on Seed Production of Maize in Hexi Oasis Irrigation Area. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [19] 周奇, 王凤新, 赵妍, 等. 西北旱区膜下滴灌的水氮管理及种植密度对制种玉米生长的影响. *中国农学通报*, 2016, 32(21): 166-173.
Zhou Q, Wang F X, Zhao Y, et al. Influence of water and nitrogen management and planting density on seed maize growth under drip irrigation with mulch in arid region of Northwest China. *Chinese Agric Sci Bull*, 2016, 32(21): 166-173.
- [20] 李晶晶, 臧文静, 黎耀军, 等. 喷灌施氮管理对春玉米产量及水氮利用的影响. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(12): 1277-1283.
Li J J, Zang W J, Li Y J, et al. Effects of different nitrogen managements on spring maize yield, water and nitrogen use efficiency under sprinkler fertigation. *J Drain Irrig Mach Eng*, 2020, 38(12): 1277-1283.
- [21] 关凯心, 郭尔静, 高继卿, 等. 华北地区一年两熟种植模式智慧应对气候变化的水氮管理措施. *中国农业气象*, 2023, 44(6): 453-468.
Guan K X, Guo E J, Gao J Q, et al. Climate-smart water-nitrogen managements for main patterns of double-cropping system in North China Plain. *Chinese J Agrometeorol*, 2023, 44(6): 453-468.
- [22] 程焱, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用. *土壤学报*, 2019, 56(3): 507-515.
Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate condi-

- tions in soil N nutrient management. *Acta Pedol Sinica*, 2019, 56(3): 507-515.
- [23] 郭建平, 栾青, 王婧瑄, 等. 玉米冠层对降水的截留模型构建. *应用气象学报*, 2020, 31(4): 397-404.
- Guo J P, Luan Q, Wang J X, et al. Model construction of rain-fall interception by maize canopy. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 397-404.
- [24] 朱凤磊, 张立新, 胡雪, 等. 基于蝙蝠优化 BP-PID 算法的精准施肥控制系统研究. *农业机械学报*, 2023, 54(增刊 I): 135-143.
- Zhu F L, Zhang L X, Hu X, et al. Research on precision fertilization control system based on bat optimization BP-PID algorithm. *Trans Chinese Soc Agric Mach*, 2023, 54(Suppl I): 135-143.
- [25] Probert M E, Keating B A, Thompson J P, et al. Modelling water, nitrogen, and crop yield for a long-term fallow management experiment. *Aust J Exp Agric*, 1995, 35(7): 941-950.
- [26] Asseng S, van Keulen H, Stol W. Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands. *Eur J Agron*, 2000, 12(1): 37-54.
- [27] Wang G C, Luo Z K, Wang E L, et al. Reducing greenhouse gas emissions while maintaining yield in the croplands of Huang-Huai-Hai Plain, China. *Agric For Meteor*, 2018, 260: 80-94.
- [28] Zhao G, Bryan B A, Song X D. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters. *Ecol Model*, 2014, 279: 1-11.
- [29] 孙爽, 王春乙, 宋艳玲, 等. 我国北方一作区马铃薯高产稳产区分布特征. *应用气象学报*, 2021, 32(4): 385-396.
- Sun S, Wang C Y, Song Y L, et al. Distributions of high and stable yield zones for potato in the single-cropping region in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 385-396.
- [30] 温振民, 张永科. 用高稳系数法估算玉米杂交种高产稳产性的探讨. *作物学报*, 1994, 20(4): 508-512.
- Wen Z M, Zhang Y K. Discussion on estimating high and stable yield of maize hybrids by high stability coefficient method. *Acta Agron Sinica*, 1994, 20(4): 508-512.
- [31] 贾新合, 王金召, 刘淑梅, 等. 应用高稳系数法分析棉花新品种的高产稳产性. *江西棉花*, 2000, 22(3): 23-25.
- Jia X H, Wang J Z, Liu S M, et al. To analyse the high and stable yields of cotton new breeds by practising high and stable coefficient method. *Jiangxi Cottons*, 2000, 22(3): 23-25.
- [32] 王晓煜, 杨晓光, Tao Li, 等. 东北三省水稻干湿交替灌溉模式适宜性分区. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 111-120.
- Wang X Y, Yang X G, Tao L, et al. Rice suitability zoning of alternative wetting and drying irrigation mode in three provinces of Northeast China. *Trans Chinese Soc Agric Eng*, 2018, 34(6): 111-120.
- [33] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [34] Duncan D B. Multiple range and multiple *F* tests. *Biometrics*, 1955, 11(1): 1-42.
- [35] Kruskal W H, Wallis W A. Errata: Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc*, 1952, 47(260): 583-621.
- [36] 王科捷, 杨乔乔, 王佳, 等. 水氮协同对玉米光合特性及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(7): 48-55.
- Wang K J, Yang Q Q, Wang J, et al. Synergistic effects of water and nitrogen on photosynthetic characteristics and yield of maize. *Soil Fertil Sci China*, 2023(7): 48-55.
- [37] 朱丽, 史海滨, 王宁, 等. 基于 ISAREG 模型的小麦间作玉米优化灌溉制度研究. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4): 26-31.
- Zhu L, Shi H B, Wang N, et al. Crop water requirement and optimization of irrigation system of intercrop wheat and maize by ISAREG model. *J Irrig Drain*, 2012, 31(4): 26-31.
- [38] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响. *环境科学*, 2019, 40(5): 2413-2425.
- Wang X Y, Cai H J, Li L, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods. *Environ Sci*, 2019, 40(5): 2413-2425.
- [39] 李莹, 王国复. 气象灾害风险管理系统设计与应用. *应用气象学报*, 2022, 33(5): 628-640.
- Li Y, Wang G F. Design and implementation of meteorological disaster risk management system. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5): 628-640.
- [40] He D, Wang E L, Wang J, et al. Uncertainty in canola phenology modelling induced by cultivar parameterization and its impact on simulated yield. *Agric For Meteor*, 2017, 232: 163-175.
- [41] Han C Y, Zhang B Z, Chen H, et al. Novel approach of upscaling the FAO AquaCrop model into regional scale by using distributed crop parameters derived from remote sensing data. *Agric Water Manag*, 2020, 240. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2020. 106288.
- [42] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物生长模型区域应用中升尺度问题的研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 89-91.
- Liu B C, Wang S L, Ma Y P. A study on abroad challenges of scaling-up of crop models for regional applications. *Chinese J Eco Agric*, 2003, 11(4): 89-91.
- [43] 孙光辉, 段居琦, 李俊儒, 等. 气候-土地综合影响的我国油茶农业气候区划. *应用气象学报*, 2024, 35(4): 444-455.
- Sun G H, Duan J Q, Li J R, et al. Agro-climatic zoning of oiltea camellia in China based on climate-land integrated impacts. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(4): 444-455.
- [44] 王俊方, 周广胜, 宋艳玲, 等. 气象条件对廉玉 1 号玉米产量的影响. *应用气象学报*, 2023, 34(3): 373-378.
- Wang J F, Zhou G S, Song Y L, et al. Effects of meteorological conditions on the yield of Lianyu No. 1 maize. *J Appl Me-*

eteor Sci, 2023, 34(3): 373-378.

- [45] 叶佩, 宋春燕, 刘凯文, 等. 江汉平原不同稻作模式下温室气体排放特征. *应用气象学报*, 2022, 33(6): 748-758.

Ye P, Song C Y, Liu K W, et al. Greenhouse gas emission characteristics of different rice cropping patterns in Jianghan Plain. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 748-758.

- [46] 张慧, 高全, 常姝婷, 等. 东北雨养玉米田碳交换年际变化及影响因素. *应用气象学报*, 2023, 34(2): 246-256.

Zhang H, Gao Q, Chang S T, et al. Interannual carbon exchange variability of rain-fed maize fields in Northeast China and its influencing factors. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(2): 246-256.

Water-nitrogen Managements for Spring Maize at Tuquan, Inner Mongolia Based on APSIM

Guo Erjing¹⁾ Yang Feiyun¹⁾ Wu Lu¹⁾ Sun Shuang²⁾ Gao Jiabao³⁾
Zhang Chaoqun³⁾ Zhang Ling³⁾

¹⁾ (China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Tuquan Meteorological Bureau, Hinggan League of Inner Mongolia Autonomous Region, Hinggan League 137500)

Abstract

Water and nitrogen are critical factors that constrain the sustainable production of dryland agriculture. With increasingly severe crisis of water and nitrogen resources and environment, exploring and optimizing water-nitrogen managements, and hence achieving coordinated and unified resource conservation, high and stable grain production, and high efficiency are of great significance for agricultural development. Key parameters of APSIM (agricultural production system simulator) are calibrated and validated based on spring maize phenology, yield, and field management data from Tuquan, Inner Mongolia Autonomous Region from 2013 to 2022. Combined with meteorological data from 1981 to 2022 at Tuquan, water-nitrogen management scenarios are designed under different water deficit levels. Optimal water-nitrogen managements for spring maize at Tuquan are proposed based on indicators including spring maize yield, irrigation amount, nitrogen application amount, water productivity, and agronomic efficiency of applied nitrogen. Furthermore, the suitable irrigation and nitrogen application amounts for spring maize under different precipitation year types are analyzed. Results show that normalized root mean squared errors of the simulated and observed days from emergence to flowering, days from emergence to maturity, and yield of spring maize are 1.3%, 1.2% and 2.8%, respectively. APSIM can quantitatively simulate the growth period and yield of spring maize. Based on the principle that yield, water productivity, and agronomic efficiency of applied nitrogen of spring maize do not significantly decrease compared to the maximum values of all scenarios, and irrigation and nitrogen application amounts do not significantly increase compared to the minimum values of all scenarios, four management measures with no significant differences can be selected, namely, starting automatic irrigation when water deficit reaches 40%, 50%, 60% at the depth of 0–100 cm, and when the water deficit reaches 60% at the depth of 0–60 cm. Among them, the optimal auto-irrigation management for spring maize at Tuquan is to apply irrigation when the water deficit reaches 60% at the depth of 0–100 cm. In this scenario, the irrigation amount is 171.0 mm, and the nitrogen application amount is 197.8 kg · hm⁻². When the precipitation during the spring maize growing season is 200–

400 mm, the appropriate irrigation amount is 233.0–283.5 mm, and the nitrogen application amount is 176.9–219.3 kg · hm⁻². When the precipitation during the spring maize growing season is 401–600 mm, the appropriate irrigation amount is 110.5–148.4 mm, and the nitrogen application amount is 218.3–241.5 kg · hm⁻², respectively. When the precipitation during the spring maize growing season is 601–800 mm, the suitable irrigation amount is 125.0–155.0 mm, and the nitrogen application amount is 211.8–249.9 kg · hm⁻². This study provides a quantitative reference for utilizing crop mechanism models in real-time monitoring, diagnosis, and precise management of crop water and nitrogen.

Key words: spring maize; yield; water productivity; agronomic efficiency of applied nitrogen; water-nitrogen management