

沿黄灌区水肥一体化条件下 玉米水氮优化研究

苗世龙^{1,2,3}, 李仙岳^{1,2,3}, 史海滨^{1,2,3}, 闫建文^{1,2,3},
丁世杰^{1,2,3}, 刘红星^{1,2,3}, 苗平⁴

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 高效节水技术装备与水土环境效应
内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古自治区生态水文与水资源高效利用重点实验室,
内蒙古 呼和浩特 010018; 4. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要:为进一步提高黄河南岸灌区水氮利用效率,实现农田水肥深度节约的目标,于2023年在鄂尔多斯市杭锦旗吉日嘎朗图镇开展了滴灌条件水氮调控试验,研究了滴灌条件下不同水氮处理对玉米产量及水氮利用效率的影响并进行了水氮用量优化。结果表明:同一灌水条件下,中氮处理玉米产量较较低氮处理增加23.3%、水分利用效率增加7.14%、氮肥偏生产力降低18.3%,较高氮处理玉米产量增加2.8%、水分利用效率增加7.7%、氮肥偏生产力增加38.1%。同一施肥条件下,中水处理玉米产量较较低水处理增加37.1%、水分利用效率增加26.1%、氮肥偏生产力增加16.6%,较高水处理玉米产量增加12.8%、水分利用效率增加38.3%、氮肥偏生产力增加12.9%。建立灌水量、施氮量与玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力之间的三组回归模型,通过寻优得到三组水氮区间并取交集,获得同时满足高产、高水氮利用效率的全生育期水氮总用量优化区间为 $1\ 800\sim 2\ 046\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 $210\sim 249.2\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。引用以Jensen模型为基础的水氮生产函数对生育期水氮总用量优化区间进行了各生育期分配,合理分配了滴灌条件下各生育期水氮制度。研究成果可为沿黄南岸灌区玉米种植水肥管理模式和方案提供参考。

关键词:水氮优化;水氮生产函数;滴灌施肥;沿黄灌区

中图分类号:S275.6; S277.7 **文献标志码:**A

Optimization of maize water and nitrogen under the condition of integrated water and fertilizer in the irrigation area along the Yellow River

MIAO Shilong^{1,2,3}, LI Xianyue^{1,2,3}, SHI Haibin^{1,2,3}, YAN Jianwen^{1,2,3},
DING Shijie^{1,2,3}, LIU Hongxing^{1,2,3}, MIAO Ping⁴

(1. Inner Mongolia Agricultural University, College of Water Resources and Civil Engineering, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center for Efficient Water-Saving Technology and Equipment and Soil and Water Environment Effect, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High-Efficient Utilization of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 4. Ordos City River and Lake Protection Center, Ordos, Inner Mongolia 017200, China)

Abstract: To further enhance water and nitrogen use efficiency in the irrigation areas on the southern bank of the Yellow River and achieve the goal of significant water and fertilizer conservation in farmland, an experiment on groundwater nitrogen control under drip irrigation was conducted in Garangtu Town, Hangjin Banner, Ordos City, in 2023. The study examined the effects of various water and nitrogen treatments on maize yield and water and nitrogen use efficiency under drip irrigation, with the aim of optimizing the water and nitrogen application rates. The results showed under the medium nitrogen treatment the yield of maize increased by 23.3%, the water use efficiency increased by 7.14%, and the partial productivity of nitrogen fertilizer decreased by 18.3% when compared with low nitrogen treatment. When comparing with the high nitrogen treatment, the medium nitrogen treatment, the yield of

收稿日期:2024-03-01

修回日期:2024-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52369008);内蒙古自治区水利科技项目(NSK202201);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFHH0039);一流学科科研专项(YLXKZX-NND-022)

作者简介:苗世龙(2001-),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:2806497005@qq.com

通信作者:闫建文(1985-),男,内蒙古包头人,副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:baotouyan13579@163.com

maize increased by 2.8%, and the water use efficiency increased by 7.7%, and the partial productivity of nitrogen fertilizer increased by 38.1%. Under the same fertilization condition, the yield, water use efficiency and nitrogen partial productivity of maize under middle water treatment increased by 37.1%, 26.1% and 16.6% when compared with low water treatment. The yield increased by 12.8%, water use efficiency and nitrogen partial productivity increased by 38.3% and 12.9% under the higher water treatment. Three sets of regression models were established between irrigation amount, nitrogen application amount, corn yield, water use efficiency and nitrogen partial productivity. Through optimization, three sets of water and nitrogen intervals were obtained, and their intersection was taken. The optimal interval of total water and nitrogen use in the growing period was $1\ 800\sim 2\ 046\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ and $210\sim 249.2\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which both met high yield and high water and nitrogen use efficiency. The water and nitrogen production function based on Jensen model was used to allocate the optimal range of total water and nitrogen consumption in each growth period, and the water and nitrogen system in each growth period under drip irrigation was rationally allocated. The research results can provide reference for water and fertilizer management models and plans for maize planting in the irrigation area along the southern bank of the Yellow River.

Keywords: water and nitrogen optimization; water and nitrogen production function; drip irrigation and fertilization; irrigation district along the Yellow river

传统农业中,粗放的水肥管理模式导致资源浪费严重,解决该问题的有效途径之一是实施水肥一体化技术^[1]。随着国家节水战略和高标准农田建设的提出,截至2020年我国水肥一体化技术推广面积达到0.1亿 hm^2 、增产粮食225亿 kg 、节水150亿 m^3 、节肥30万 t ^[2],缓解了农业生产缺水矛盾并提高了水肥综合生产力。内蒙古黄河南岸灌区是黄河“几字湾”高质量发展的重要组成部分,但目前存在水资源短缺、水肥利用率低等问题,直接威胁到黄河流域粮食安全与生态安全^[3]。玉米是内蒙古黄河南岸灌区第一大粮食作物,但目前此区玉米水肥一体化制度较为粗放,存在水肥施用频次高、关键与非关键生育期水肥用量无差异等问题,还需深度优化细化水肥一体化制度,实现灌区玉米种植节水节肥的目标,提升当地玉米种植水-粮-生综合效益^[4]。

目前已有众多学者开展了水肥一体化的相关研究,研究表明适量的施用水氮可以显著提高玉米生长性状、产量、水肥利用效率等指标,而过度施用水氮则玉米各指标无明显增加^[5-8]。部分学者开展了水氮用量优化研究,如李仙岳等^[9]、何沁雪^[10]建立了灌溉定额、施氮量与玉米产量的二元二次回归模型,优化出目标产量下的灌水与施氮区间。李仙岳等^[11]分析了水氮互作对水肥利用效率与经济效益的影响,同时也优化出了经济效益最大情况下的水氮用量。丛鑫等^[12]建立了产量、水分利用效率、氮肥偏生产力、经济效益与灌溉量、施氮量的二次回归方程,计算得到各指标最大值对应的水氮用量。以往研究只单一考虑到水氮与产量的关系、水氮与水分利用效率的关系、水氮与氮肥利用效率的

关系,所优化出的水氮用量区间不能兼顾高产、高效的双层内涵,且以上研究对水氮用量的优化只针对全生育期总灌水量和施氮量的优化,没有根据作物各个生育期水氮需求进行分配。因此需要综合考虑水氮与产量、水分利用效率、氮肥偏生产力所优化出的水氮用量区间,对各类优化出的水氮用量区间进行交集整合,以达到高产、高效的双重效果,并将其合理地分配到玉米各生育期,既满足产量的需求也能深度提升滴灌水氮利用效率。

本文针对以往研究出现的问题,开展沿黄灌区水肥一体化条件下玉米水氮优化研究,分析玉米滴灌条件下不同水氮处理对产量、水分利用效率、氮肥偏生产力的影响,建立水氮用量与产量、水分利用效率、氮肥偏生产力的二元二次回归方程,通过方案寻优得到三组全生育期水氮用量区间,综合考虑高产、高效协同将三组水氮用量区间进行交集整合得到高产、高效协同的全生育期最优灌水施肥区间,并引入以Jensen模型为基础且考虑氮肥影响的水氮生产函数,计算出各个生育期水分敏感指数^[13-14],并利用该指数寻求高产、高效协同的全生育期最优灌水施肥区间,并根据各生育期水氮需求敏感性分配水肥用量,进而提升滴灌条件下玉米水氮利用效率,为沿黄灌区滴灌玉米寻求节水节肥提供管理模式和方案参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023年在内蒙古鄂尔多斯市西北部杭锦旗吉日嘎朗图镇光茂五社(107.9°E , 40.8°N)进

行。此区光照充足、温差大,属于温带大陆性气候,多年平均气温 7.9℃,年平均降水量 160 mm,降雨集中在每年 7~9 月(8 月最多)。试验区土壤以粉土和粉砂壤土为主,0~20 cm 土层平均土壤容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,全氮质量比 $105.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷质量比 $55.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾质量比 $120.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 8,地下水埋深约为 3 m。

1.2 试验设计

玉米供试品种为‘宁玉 688’,试验田在播种前进行旋耕、平整。本次试验设灌水与施肥两个变量,三种灌水定额分别为当地传统灌水量的 50% ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W1)、75% ($225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W2)、100% ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, W3),生育期灌水 8 次,灌溉方式为滴灌,灌水用水表计量;设置三种施氮(尿素)量分别为 $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1)、 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)、 $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3),在拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期按照 2:3:3:2 的比例施入;底肥

为复合有机肥(含有 20%N、25% P_2O_5 、10% K_2O),施氮量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不灌水不施肥处理记为 W0N0, W3N3 为当地村民灌水施氮量,具体灌水施肥处理见表 1。本试验共 10 个处理,每个处理 3 次重复,共 30 个小区,每个小区面积为 $31 \text{ m} \times 13 \text{ m}$,各小区单独随机布置,试验区玉米种植与当地保持一致,采用覆膜种植,一膜两行,膜宽 60 cm,宽行距 1 m、窄行距 35 cm,株距 23 cm,种植密度为 $61 \text{ 100 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,于 5 月 29 日播种。红蜘蛛是该地玉米种植常见病虫害,每 667 m^2 使用 50%溴氰菊酯乳油、25%乙氨基甲酸吡虫啉悬浮剂两种药剂溶于 15 kg 水,利用无人机喷洒在植株叶面,并在玉米生长前中期进行中耕除草,其他田间管理与当地相同。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 田间观测指标 气象数据:在杭锦旗吉日嘎朗图镇气象站获取气象数据,每天观测并自动记录太阳辐射、温度、湿度、风速和降雨量等(图 1)。

表 1 2023 年滴灌条件下不同处理玉米水氮用量

Table 1 Different irrigation and nitrogen application rates of maize under drip irrigation in 2023

处理 Treatment	灌水量 Total irrigation/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$				施氮量 Total nitrogen application/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$					编码值 Code value	
	拔节期 Jointing stage	大喇叭 口期 Big flare period	灌浆期 Filling period	灌溉总量 Total irrigation $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	拔节期 Jointing stage	大喇叭 口期 Big flare period	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling period	施氮总量 Total nitrogen application $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	编码值 X_1 Code value X_1	编码值 X_2 Code value X_2
W0N0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
W1N1	300	600	300	1200	28	42	42	28	140	-1	-1
W1N2	300	600	300	1200	42	63	63	42	210	-1	0
W1N3	300	600	300	1200	56	84	84	56	280	-1	1
W2N1	450	900	450	1800	28	42	42	28	140	0	-1
W2N2	450	900	450	1800	42	63	63	42	210	0	0
W2N3	450	900	450	1800	56	84	84	56	280	0	1
W3N1	600	1200	600	2400	28	42	42	28	140	1	-1
W3N2	600	1200	600	2400	42	63	63	42	210	1	0
W3N3	600	1200	600	2400	56	84	84	56	280	1	1

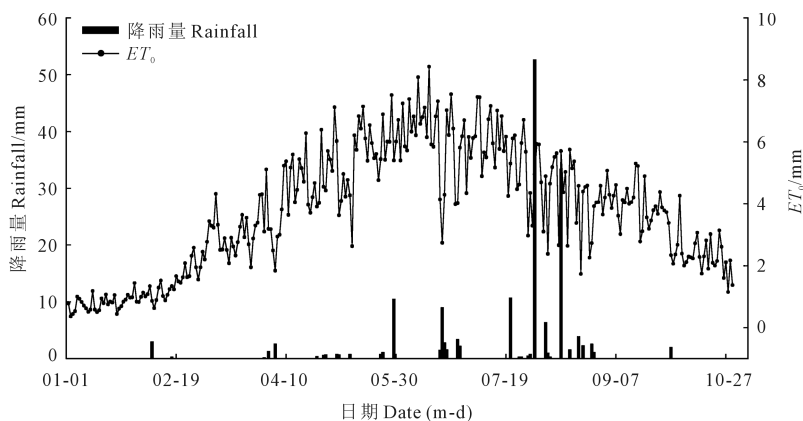


图 1 2023 年玉米生育期气象数据

Fig.1 Meteorological data of maize growth period in 2023

产量测定:在玉米成熟期,10月2日进行取样。每个小区每行取一株,共取6株,分别测量穗长、穗宽和穗粒数,自然晾干后测百粒重和含水率,并求得折算后各个小区产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.2 水肥利用效率^[15] 采用水量平衡法计算耗水量:

$$ET = P + I - \Delta SWS - R - D \quad (1)$$

式中, ET 为作物耗水量(mm); P 为玉米生育期降雨量(mm); I 为玉米生育期总灌溉量(mm); ΔSWS 为土壤贮水量(mm); R 为地表径流(mm); D 为耕层土壤水的渗漏量(mm)。该地区地势平坦且地下水位较深(3 m左右),故不考虑地表径流和深层渗漏。

水分利用效率(WUE)计算公式为:

$$WUE = Y/ET/10 \quad (2)$$

式中, Y 为玉米产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

氮肥偏生产力(P_{FPN})计算公式为:

$$P_{\text{FPN}} = Y/F \quad (3)$$

式中, F 为氮肥施入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 产量、水分利用效率、氮肥偏生产力耦合模型 试验研究滴灌玉米灌水量、施氮量与玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力之间的回归关系,以灌水量(X_1)与施氮量(X_2)为自变量,玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力为因变量(Y),建立三者之间的回归模型。

$$Y = a + b \times X_1 + c \times X_2 + d \times X_1^2 + e \times X_2^2 + f \times X_1 X_2 \quad (4)$$

式中, a 为回归模型的常数项; b 、 c 为回归模型一次项系数; d 、 e 为回归模型的二次项系数; f 为回归模型交互项系数。

1.3.4 水肥生产函数 Jensen 模型是目前计算不同生育期水分生产的函数模型,其计算公式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m(F)} = \prod_{i=1}^n \left[\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right]^\lambda \quad (5)$$

式中, ET_{ai} 为第*i*阶段作物耗水量(mm); ET_{mi} 为充分供水条件下第*i*阶段最大耗水量(mm); Y_a 为作物实际产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $Y_m(F)$ 为产量与氮肥的函数($Y_m(F) = aF^2 + bF + c$); λ 为水分敏感指数。

1.4 数据处理

应用 Excel 进行数据统计分析,利用 SPSS Statistics 26 建立二元二次回归模型与显著性分析,Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对滴灌玉米产量的影响

由表2可知,不同水氮处理对玉米产量和百粒重具有显著影响。在同一灌水条件下,当施氮量 $< 210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米产量随着施氮量的增加而逐渐变大,施氮量 $> 210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,玉米产量随着施氮量的增加而逐渐变小,中氮处理(N2)较高氮处理(N3)增加2.8%,中氮处理较低氮处理(N1)增加23.3%。同一施肥条件下,随着灌水量的增加,玉米产量也呈现先增加后降低趋势,中水处理(W2)玉米产量较低水处理(W1)增加37.1%、较高水处理(W3)增加12.8%。不同处理百粒重介于20~30 g,灌水量相同条件下,百粒重随着施氮量先增加后减少;施肥量相同情况下,百粒重随着灌水量缓慢增加,各处理增加幅度不明显。在本试验条件下,中水中肥处理(W2N2)产量最大,为最优处理;W0N0处理产量最小。由于该地区属于温带大陆性气候,降雨少,日照充足且蒸发较大,灌水量是影响玉米产量的首要因素,施肥量为次要因素^[16]。

表2 水氮互作对玉米产量的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen interaction on maize yield

灌水处理 Irrigation treatment	施肥处理 Fertilization treatment	穗行数 Row number of spike	行粒数 Row number	百粒重 Hundred grain weight/g	穗粒重 Grain weight per spike/g	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
W1	N1	16.83±0.98a	35.00±5.06b	20.10±0.56e	118.79±30.97e	7259.46i
	N2	17.33±1.03a	36.50±3.83ab	23.32±1.78de	146.92±13.28de	8978.21h
	N3	16.67±1.03a	38.50±2.35ab	26.79±1.23b	172.60±13.84bc	10213.52f
W2	N1	16.76±1.51a	38.50±3.62c	25.20±1.68e	163.40±16.78f	9979.78g
	N2	17.33±1.03a	40.50±2.88a	28.78±1.36b	201.37±6.07a	12305.59a
	N3	17.33±1.03a	39.00±2.19ab	29.02±0.17a	195.89±14.09b	11970.76b
W3	N1	17.00±1.10a	37.83±4.71ab	26.54±1.19d	169.86±19.65cd	10380.10e
	N2	16.33±1.51a	41.00±2.00a	26.68±0.20d	178.40±20.05bc	10902.25c
W0	N3	16.37±1.03a	41.10±3.02a	25.86±0.59bc	174.49±17.00b	10685.37d
	N0	16.50±1.21a	31.92±3.25bc	18.34±1.10ef	96.59±14.30ef	6100.35j

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2 水氮互作对水肥利用率的影响

充足的水分可以促进植物对氮的吸收和利用,提高植物对水分的利用效率^[17]。如图 2A 所示,玉米耗水量随着灌水的增加而提高,中水比高水增加 8.8%、比低水增加 25%。水分利用效率随着灌水的增加呈现先增大后减小的趋势,同一灌水条件下,中氮处理玉米水分利用效率较低氮处理增加 7.14%、较高氮处理增加 7.7%;同一施肥条件下,中水处理玉米水分利用效率较低水处理增加 26.1%、较高水处理增加 38.3%,中水相比高水与低水处理下的水分利用效率较高。如图 2B 所示,对氮肥偏生产力方差分析可以看出:高水低氮(W3N1)处理下的氮肥偏生产力最高(74 kg·kg⁻¹),低水高氮处理下的氮肥偏生产力最小(36.6 kg·kg⁻¹);同一灌水条件下,中氮处理玉米氮肥偏生产力较低氮处理降低 18.3%、较高氮处理增加 38.1%;同一施肥条件下,中水处理氮肥偏生产力较低水处理增加 16.6%、

较高水处理增加 12.9%。适度施肥有利于玉米对氮素的吸收利用,当施氮量超过 210 kg·hm⁻²时,继续施肥导致肥料浪费,利用率下降,造成环境污染等问题。

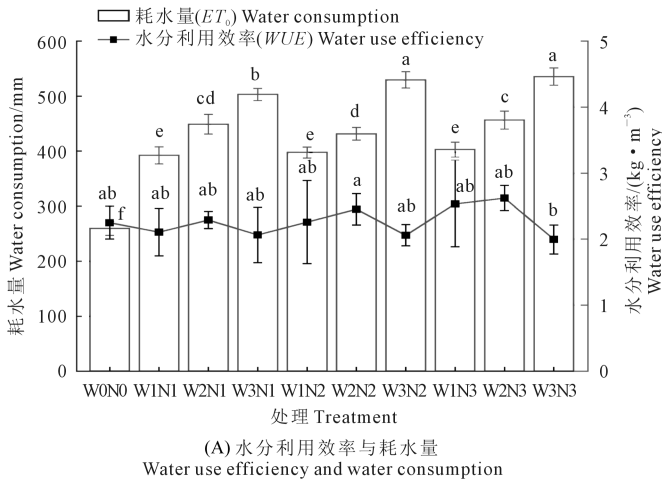
2.3 产量模型的建立

对产量和灌水量与施氮量进行回归拟合^[18],如式(6)和图 3(见 146 页)所示:

$$Y = 11849.78 + 1085.89X_1 + 708.39X_2 -$$

$$1181.67X_1^2 - 1147.5X_2^2 + 662.42X_1X_2 \quad (6)$$

式中, Y 为玉米产量(kg·hm⁻²); X_1 、 X_2 为编码值,分别为试验设计的灌水量(m³·hm⁻²)和施肥量(kg·hm⁻²);模型模拟决定系数 R^2 为 0.92371,模型拟合程度较高,能够很好地反映产量、水、氮三者之间的关系。 X_1^2 、 X_2^2 的系数均为负值,说明过量的灌水与施肥不利于玉米产量的积累; X_1 、 X_2 的系数为正值,说明适量的灌水与施肥有助于玉米产量的提高。



注:图中小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 2 水氮互作对玉米水分利用效率与氮肥偏差生产力的影响

Fig.2 Effects of water and nitrogen interaction on water use efficiency and nitrogen deviation productivity of maize

2.3.1 单因素效应分析 为进一步研究灌水与施肥对玉米产量的影响,对式(6)进行降维分析,分别设置灌水和施氮为 0 因子,得到灌水与施肥的单因素效应函数方程,如式(7)、(8)。单因素对产量的影响如图 4A 所示,灌水量与施氮量均与产量形成开口向下的二次函数。灌水与施肥单因素对玉米产量为正效应,随着灌水量与施肥量的增加,二次函数出现最大峰值。灌水量编码值为 0.459 时产量最大为 12 098 kg·hm⁻²;当灌水量编码值小于 0.459 时,随着灌水量的增加,玉米产量增大;当灌水量编码值大于 0.459 后,增大灌水量,玉米产量有变小趋势。施肥量编码值为 0.31 时,玉米产量达到 11 958

kg·hm⁻²;施肥量编码值小于 0.31 时,玉米产量随着施肥量的增加而增加;施肥量编码值大于 0.31 后,增加施肥量,玉米产量也有变低的趋势。当灌水施肥超出一定量后,产量有明显下降趋势,证明灌水施肥超出一定量后,产量有明显下降趋势,证明灌水施氮量越大则玉米产量越高的说法并不正确,通过水氮效应分析发现,灌水为影响玉米产量的主要因素而施肥为次要因素。

$$Y = 11849.78 + 1085.89X_1 - 1181.67X_1^2 \quad (7)$$

$$Y = 11849.78 + 708.39X_2 - 1147.5X_2^2 \quad (8)$$

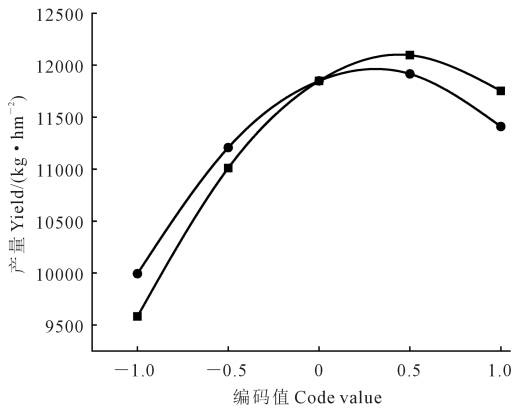
2.3.2 单因素边际效应分析 将式(7)、(8)求一阶导数得到灌水量、施氮量的边际效应方程,如式(9)、(10),由两因素边际函数绘出对应的边际效应

(图4B)所示,随着灌水量与施肥量编码值的增加,边际产量效应逐渐变小,图中横坐标之上表示因素可促进玉米产量的增加,横坐标之下表示会降低玉米产量。当灌水量编码值 X_1 值小于0.459时,灌水会促进玉米产量的增加;当编码值 X_1 大于0.459时,灌水会降低玉米产量。当施肥量编码值 X_2 值小于0.31时,施肥会促进玉米产量的增加;当编码值 X_2 大于0.31时,灌水会降低玉米产量。

$$\frac{dY}{dX_1} = 1085.89 - 2363.33X_1 \quad (9)$$

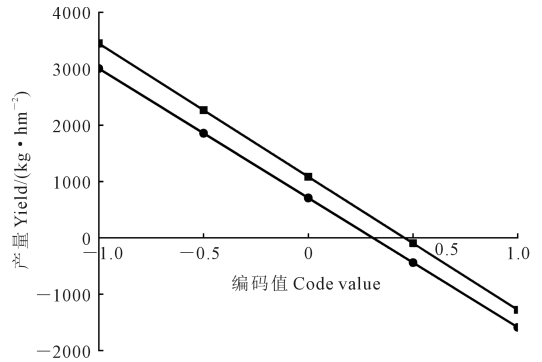
$$\frac{dY}{dX_2} = 708.39 - 2295X_2 \quad (10)$$

2.3.3 模型寻优 结合当地农民需求,寻求产量最优,同时保证灌水与施肥利用效率较高,本试验采用频数法对产量进行寻优(寻优过程见表3),在编



(A) 产量边际效应分析
Yield marginal effect analysis

■ 灌水量 Irrigation quantity



(B) 产量边际效应求导分析
Yield marginal effect derivation analysis

● 施肥量 Fertilizer application amount

图4 单因素对产量影响曲线

Fig.4 Influencing curve of single factor on yield

表3 产量寻优

Table 3 Yield optimization

编码 Code	X_1		X_2	
	次数 Number of times	频数 Frequency	次数 Number of times	频数 Frequency
-1	0	0	0	0
-0.5	3	0.20	3	0.21
0	4	0.27	4	0.29
0.5	4	0.27	4	0.29
1	4	0.27	3	0.21
总次数 Total number of times	15		14	
编码加权均值 Coded weighted mean	0.30		0.25	
标准差 Standard deviation	0.56		0.55	
95%置信区间 95% confidence interval	0.0019~0.5981		-0.0505~0.5505	
产量最优配比方案 Optimal ratio scheme of output	1800~2160 m ³ ·hm ⁻²		210~250 kg·hm ⁻²	

码值-1到1之间等间距取5个水平(-1、-0.5、0、0.5、1)。通过模拟共寻得25套组合方案。在本次试验中,灌水量为1800 m³·hm⁻²,施氮量为210 kg·hm⁻²时,产量达到最大值为12305 kg·hm⁻²,但灌水量1800 m³·hm⁻²可能不是产量最大值,经过产量寻优模型,发现产量最大出现在灌水1800~2160 m³·hm⁻²以及施氮210~250 kg·hm⁻²之间。此寻优结果符合节水节肥种植功效^[19]。

2.4 效率模型的建立及用量优化

根据数据分别建立水分利用效率、氮肥偏生产力随灌水量与施氮量的关系如图5所示,拟合二元二次回归模型,得到水分利用效率、氮肥偏生产力与灌水量编码值(X_1)、施肥量(X_2)的回归模型方程,分别如式(11)、(12)所示,模型模拟决定系数 R^2 分别为0.9640、0.8506,模型拟合程度较高。

$$Y = 55.53 + 3.86X_1 + 1.99X_2 - 6.66X_1^2 - 1.98X_2^2 + 2.65X_1X_2 (R^2 = 0.9640) \quad (11)$$

$$Y = 2.67 + 0.13X_1 + 0.12X_2 - 0.42X_1^2 - 0.12X_2^2 + 0.12X_1X_2 (R^2 = 0.8506) \quad (12)$$

根据试验测得,中水中氮处理下的产量、水肥利用效率相对较优,分别为12305.59 kg·hm⁻²,6.84 kg·m⁻³,58.60 kg·kg⁻¹,对水氮利用效率回归方程单因素效应分析,进行与产量相同的寻优过程,由于论文篇幅问题,不展开详细计算。将产量、水氮利用效率下的灌水施肥区间利用venn法取交集得到最终结果(图6),产量的灌水区间为1800~2160 m³·hm⁻²,水分利用效率的灌水区间为1734~2160 m³·hm⁻²,氮肥偏生产力的灌水区间为1716~2046 m³·hm⁻²,最优灌水区间为1800~

2 046 m³ · hm⁻²。产量的施肥区间为 210~250 kg · hm⁻²，水分利用效率的施肥区间为 203~250.6 kg · hm⁻²，氮肥偏生产力的施肥区间为 210~249.2 kg · hm⁻²，最优施肥区间为 210~249.2 kg · hm⁻²。取交

集后的灌水施肥区间要比本试验中水中肥处理略大，比高水高肥处理小。寻优之后的灌水量相比于当地村民灌水量节水 17.3%~33%，施氮量节肥 11%~33.3%。

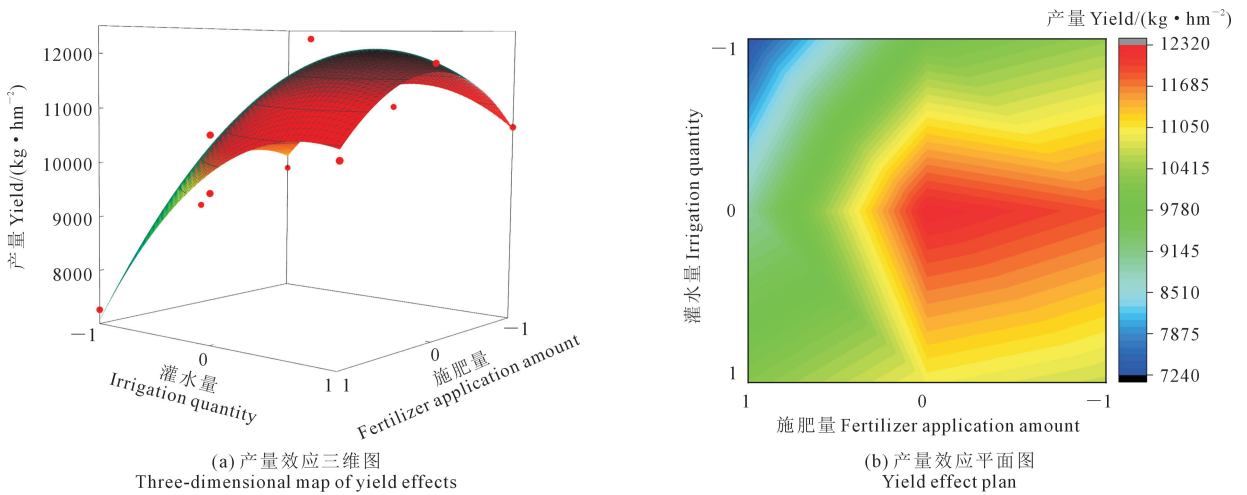


图 3 灌水量和氮肥用量拟合对玉米产量的影响

Fig.3 Effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer amount fitting on maize yield

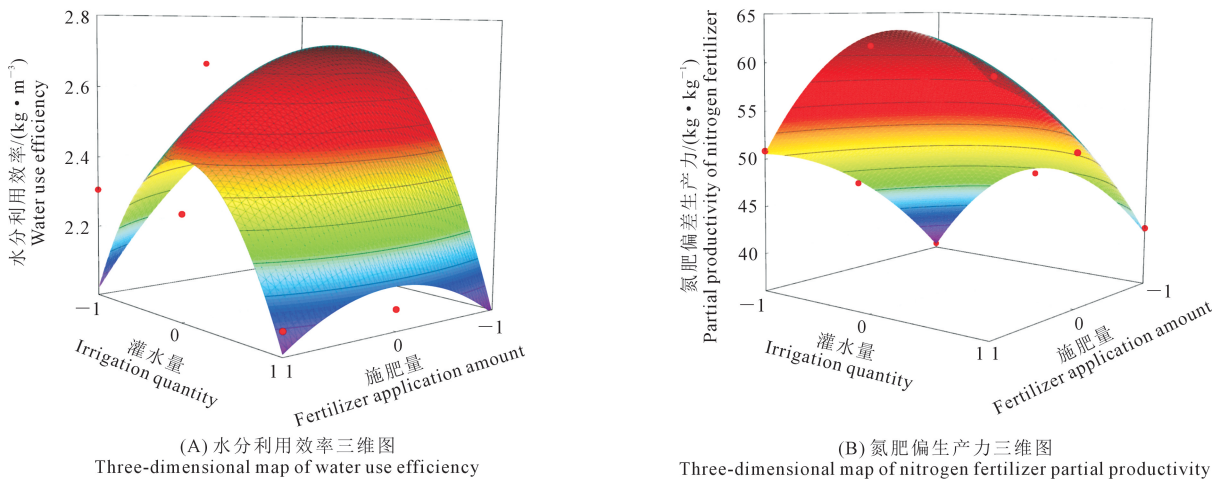


图 5 水氮与水分利用效率、氮肥偏差生产力的关系

Fig.5 Relationship between water and nitrogen, water use efficiency and nitrogen deviation productivity

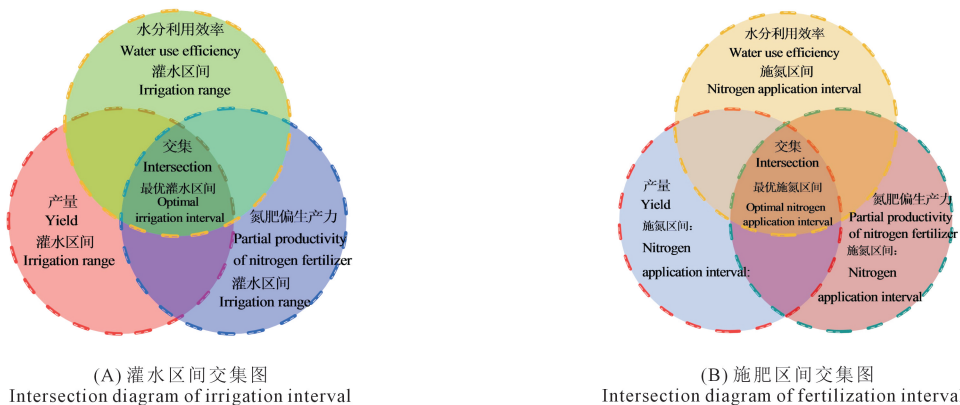


图 6 最优方案交集图

Fig.6 Intersection diagram of optimal scheme

2.5 水氮敏感指数求解及灌溉制度优化

通过产量、水分利用效率、氮肥偏生产力寻优模型取交集得到优化之后的灌水与施氮总量,但仍需进一步探索玉米不同生育期所需水量。Jensen 模型是目前广泛应用的水分生产函数模型,以作物耗水量为自变量,探索作物不同生育期水分亏缺对产量的影响^[20]。在 Jensen 模型中引入氮效应函数,研究水氮耦合交互作用,提高水氮利用率。将引入氮效应的 Jensen 模型与本试验联系,先利用 W3N1、W3N2、W3N3 处理的试验数据拟合潜在产量 $Y_m(F)$ 与施肥量的 F 的二次函数关系,如式(13)所示:

$$Y_m(F) = 2119 + 83.85F - 0.177F^2 \quad (13)$$

之后将所有试验数据用 SPSS 软件进行参数拟合,得到的 Jensen 模型形式如下:

$$\frac{Y_a}{Y_m(F) = 2119 + 83.85F - 0.177F^2} = \left[\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right]^{0.2643} \cdot \left[\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right]^{0.2617} \cdot \left[\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right]^{0.1553} \quad (14)$$

通过参数拟合得到玉米各个时期的水分敏感指数,计算发现玉米拔节期水分敏感指数为 0.2643、抽雄期水分敏感指数为 0.2617、灌浆期玉米水分敏感指数为 0.1553,拔节期为玉米生长的关键时期,水分、肥料亏缺可能使玉米受旱,影响玉米株高与茎粗等生长性状。抽雄期为玉米结实的最重要时期,也是影响产量的关键时期,故在该时期需要保证充足的水肥。灌浆期灌水量相对较小,该时期玉米已经结实坐果,较小的灌水量维持玉米生长至自然枯黄,等待收割。将寻优后灌水量结果(1 800~2 046 $m^3 \cdot hm^{-2}$)按各个时期水分敏感指数分配,寻优后施氮总量(210~249.2 $kg \cdot hm^{-2}$)按照拔节期、抽雄期、灌浆期追肥 30%、50%、20%进行分配,优化得到玉米拔节期、抽雄期、灌浆期水肥制度(表 4)。

3 讨论

水分和氮素是植物生长发育必不可少的两种元素^[21],除了影响对自身的吸收利用,还对作物的产量与效率等有着重要影响^[22]。本文通过膜下滴灌田间试验,进行了水氮耦合对玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力等方面的研究,发现适度增加灌水与施肥不仅有利于增加玉米产量,还可以提高水氮利用效率,这与丁林等^[23]研究结论较相似。本研究发现玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力会随着灌水量的增加呈现先增加后减小趋势,这与寇燕燕等^[24]研究结论相似。严富来等^[25]研究发现,氮肥偏生产力及水分利用效率随灌水水平的增加呈现先升高后降低趋势,而随施氮水平的增加呈现逐渐降低趋势,这与本研究结果一致。本研究表明,中水中氮处理下的产量和水氮利用效率相对较好,分别为 12 305.59 $kg \cdot hm^{-2}$ 、6.84 $kg \cdot m^{-3}$ 、58.60 $kg \cdot kg^{-1}$,因为试验条件下测得 W2N2 处理产量最高,持续灌水与施肥,产量将无明显变化或者出现下降趋势,并且灌水施肥超过一定量时,水氮利用效率也会降低,故不能一味进行大水大肥的管理模式,需要优化出兼顾高产、高效的灌水施肥区间。

本研究建立灌水量、施氮量与玉米产量、水分利用效率、氮肥偏生产力之间的三组回归模型,分别优化出三组水氮区间,产量下的水氮区间分别为 1 800~2 160 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 、210~250 $kg \cdot hm^{-2}$,水分利用效率下的水氮区间分别为 1 734~2 160 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 、203~250.6 $kg \cdot hm^{-2}$,氮肥偏生产力下的水氮区间分别为 1 716~2 046 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 、210~249.2 $kg \cdot hm^{-2}$ 。从优化产量角度而言,李仙岳等^[9]优化出玉米目标产量 11 000~12 000 $kg \cdot hm^{-2}$ 下的全生育期灌水区间为 2 011~2 938 $m^3 \cdot hm^{-2}$,施氮区间为 134.94~245.06 $kg \cdot hm^{-2}$ 。与之相比,本研究优化出

表 4 优化灌溉制度表

Table 4 Optimal irrigation system

生育时期 Growth period	敏感指数 Sensitivity index	水分分配比例 Water distribution ratio/%	氮肥分配比例 Nitrogen fertilizer allocation ratio/%	水量分配 Water allocation /($m^3 \cdot hm^{-2}$)	氮肥分配 Nitrogen fertilizer allocation /($m^3 \cdot hm^{-2}$)
拔节期 Jointing stage	0.2643	39	30	702~797.9	63~74.76
抽雄期 Draw stage	0.2617	38	50	684~777.5	105~124.6
灌浆期 Grouting stage	0.1553	23	20	414~470.6	42~49.84
总计 Total	0.6813	100	100	1800~2046	210~249.2

全生育期灌水总区间较小,造成该问题的原因可能是上述研究在内蒙古乌兰布和沙区,该地土壤为砂质土,且年蒸发量较大,而本研究试验区在沿黄南岸灌区,土质以壤土为主,从而导致灌水区间有差异,但施肥区间相似。从优化水氮利用效率角度而言,丛鑫等^[12]优化出冬小麦水分利用效率、氮肥偏生产力最大条件下灌水量为 $3\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $260\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与之相比,本研究优化出的灌水量同样较小,造成该问题的原因可能是上述研究的试验区位于山东省济南市长清区山东省灌溉试验中心站,该地蒸发量较大且降雨量较小,且种植作物为冬小麦,与玉米需水量不同,故导致灌水量的差异,而施肥量较相似。本研究认为只优化出产量条件下的灌水施肥或者水氮利用效率条件下的灌水施肥较单一,故本文将三组水氮区间交集整合得到高产、高效的全生育期最优灌水总区间为 $1\ 800 \sim 2\ 046\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮总区间为 $210 \sim 249.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。引入以 Jensen 模型为基础且考虑氮肥影响的水氮生产函数计算出拔节期、抽雄期、灌浆期的水分敏感指数分别为 0.2643、0.2617、0.1553,该结果与 Zhang 等^[26]和司昌亮等^[27]结果一致。

目前将水氮总量与水分敏感指数相结合对全生育期水氮制度进行深度优化的相关研究较少,本文将交集整合后的全生育期最优灌水总区间 $1\ 800 \sim 2\ 046\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 按照各个生育期水分需求敏感指数分配到玉米生长的各个生育期,将施氮量 $210 \sim 249.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 按照拔节期、抽雄期、灌浆期追肥 30%、50%、20%进行分配。制定出一套针对各个生育期深度优化后灌溉施肥制度,综合考虑了高产、高效的协调效果,对沿黄灌区的玉米种植有至关重要的意义。

4 结 论

1) 灌水量、施氮量对玉米产量和水氮利用效率有显著影响,中水中氮处理下的产量为 $12\ 305.59\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较高水高氮处理增产 14%、水分利用效率增加 32%、氮肥偏生产力增加 43%。综合考虑,认为中水中氮处理为试验条件下的最优处理。

2) 建立灌水、施肥量与产量、水分利用效率、氮肥偏生产力之间的三组回归模型,分别优化出三组全生育期水氮区间,综合考虑高产、高效的协同,将三组区间求交集得到全生育期最优灌水区间与施氮区间分别为 $1\ 800 \sim 2\ 046\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $210 \sim 249.2\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3) 利用水氮生产函数求得玉米各个生育期水

分敏感指数,其中拔节期指数为 0.2643,抽雄期指数为 0.2617,灌浆期指数为 0.1553。

4) 根据求得的玉米各个生育期水分敏感指数,将全生育期最优灌水区间合理地分配到玉米生长的各个生育期,得到的灌溉施肥制度为:拔节期灌水 $702 \sim 797.9\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮 $63 \sim 74.76\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,抽雄期灌水 $684 \sim 777.5\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮 $105 \sim 124.6\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌浆期灌水 $414 \sim 470.6\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮 $42 \sim 49.84\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,该制度可以作为沿黄南岸灌区水氮管理模式,以实现玉米农田生产长期可持续发展需求。

参 考 文 献:

- [1] 顾桂栋, 窦超银, 孟维忠, 等. 风沙土膜下滴灌氮肥运筹对玉米生长、干物质和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021, (8): 25-30.
GU G D, DOU C Y, MENG W Z, et al. Effects of nitrogen application of drip irrigation under mulch on growth, dry matter and yield of maize in aeolian sandy soil[J]. Water Saving Irrigation, 2021, (8): 25-30.
- [2] 潘敏睿, 马军, 王杰, 等. 水肥一体化技术发展概述[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 204-210.
PAN M R, MA J, WANG J, et al. Development of water and fertilizer integration technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 204-210.
- [3] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.
- [5] 陈萍, 迟海峰, 王娟. 滴灌水肥一体化模式下不同施肥量对玉米生长性状及产量的影响[J]. 农业科学研究, 2017, 38(4): 31-34.
CHEN P, CHI H F, WANG J. The effect of different fertilizer application amounts on maize growth traits and yield under drip irrigation of integral control of water and fertilization[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2017, 38(4): 31-34.
- [6] 梁飞, 王国栋, 王克全, 等. 滴施不同水溶肥对玉米产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 53-59.
LIANG F, WANG G D, WANG K Q, et al. Effect of the different water soluble fertilizer dripping application on yield formation of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 53-59.
- [7] 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[J]. 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[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 161-168.
- [8] 杜君, 杨占平, 魏义长, 等. 北方夏玉米滴灌施肥一体化技术应用效果[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 621-628.
DU J, YANG Z P, WEI Y C, et al. Application effect of integrated drip irrigation and fertilization technology for summer maize in northern China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3):

- 621-628.
- [9] 李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261-270.
LI X Y, DING Z J, YAN J W, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 261-270.
- [10] 何沁雪. 夏玉米水肥生产函数的建立及分析[J]. 农业与技术, 2019, 39(23): 29-31.
HE Q X. Establishment and analysis of water and fertilizer production function of summer maize[J]. Agriculture & Technology, 2019, 39(23): 29-31.
- [11] 李仙岳, 辛懋鑫, 史海滨, 等. 干旱盐渍化地区控释肥水氮耦合效应与制度优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 397-406.
LI X Y, XIN M X, SHI H B, et al. Coupling effect and system optimization of controlled-release fertilizer and water in arid salinized areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 397-406.
- [12] 丛鑫, 张立志, 徐征和, 等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 315-324.
CONG X, ZHANG L Z, XU Z H, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315-324.
- [13] 汪顺生, 杨成宇, 黄一丹, 等. 基于 Jensen 模型与 SSA-BP 模型的宽垄沟灌冬小麦水氮生产函数研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 207-215.
WANG S S, YANG C Y, HUANG Y D, et al. Study on water and nitrogen production function of winter wheat with wide ridge irrigation based on Jensen model and SSA-BP model[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(9): 207-215.
- [14] 金子茗, 林彦宇, 张玉庆, 等. 黑土稻作水肥耦合对水分生产函数和产量的影响试验研究[J]. 黑龙江水利, 2015, 1(7): 1-4, 20.
JIN Z M, LIN Y Y, ZHANG Y Q, et al. Experimental study on the influence of water-fertilizer coupling on water production function and yield of rice planted in black soil[J]. Heilongjiang Water Resources, 2015, 1(7): 1-4, 20.
- [15] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 280-284.
ZHOU Z W, SHANG S H, LEI Z D. Jensen model and ANN model for water-fertilizer production function of winter wheat[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 280-284.
- [16] 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 Z. Study on the response of spring corn-soil system to different models of water and nitrogen management and applicability of DSSAT-CERES-Maize model in Hetao irrigation district [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [17] 王柏, 孙艳玲, 黄彦. 寒区水肥一体化技术对玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(2): 5-10.
WANG B, SUN Y L, HUANG Y. Effects of integrated water and fertilizer technology on maize yield and nitrogen use efficiency in cold region[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2020, 3(2): 5-10.
- [18] 张立勤, 车宗贤, 崔云玲, 等. 不同水肥条件对滴灌制种玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2018, (12): 29-32.
ZHANG L Q, CHE Z X, CUI Y L, et al. The effect of drip irrigation under different water and fertilizer condition on yield and water use efficiency of seed corn [J]. Water Saving Irrigation, 2018, (12): 29-32.
- [19] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.
XUE L, ZHOU C J, LEI Y L, et al. Effect of water and nitrogen spatial coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 91-94.
- [20] 闫建文. 盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
YAN J W. Study on water and nitrogen migration and efficient utilization of maize in salinized soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [21] 李文玲, 孙西欢, 张建华, 等. 水氮耦合对膜下滴灌设施番茄水氮生产函数影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 47-54.
LI W L, SUN X H, ZHANG J H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on water and nitrogen production function of tomato under film drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 47-54.
- [22] YILMAZ E, GÜRBÜZ T, DAGDELEN N, et al. Impacts of different drip irrigation levels on yield, yield components and water use efficiency of corn[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2010, 6(2): 53.
- [23] 丁林, 王文娟, 梁仲铎, 等. 不同水肥处理对膜下滴灌玉米农田养分及产量品质的影响[J]. 水利规划与设计, 2023, (3): 37-42, 126.
DING L, WANG W J, LIANG Z E, et al. Effects of different water and fertilizer treatments on crop nutrients, yield and quality of maize under drip irrigation [J]. Water Resources Planning and Design, 2023, (3): 37-42, 126.
- [24] 寇燕燕, 刘斌, 丁世国. 不同滴灌水量对景电灌区玉米生长发育和产量的影响[J]. 南方农机, 2023, 54(16): 66-67, 126.
KOU Y Y, LIU B, DING S G. Effect of different drip irrigation amount on growth, development and yield of maize in Jingdian irrigation area[J]. South Agricultural Machinery, 2023, 54(16): 66-67, 126.
- [25] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 283-293.
YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 283-293.
- [26] ZHANG H G, ZHANG J D. Periodical water production function of processing tomato (*Solanum lycopersicum*) subjected to water deficit in an arid environment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 34: 196-200.
- [27] 司昌亮, 尚学灵, 王旭立, 等. 半干旱区玉米膜下滴灌适宜水分生产函数模型研究[J]. 节水灌溉, 2020, (1): 39-44, 48.
SI C L, SHANG X L, WANG X L, et al. Study on water product function for maize under drip irrigation under film in the semi-arid region[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (1): 39-44, 48.