

西辽河平原浅埋滴灌下水氮运筹对玉米产量和效益的影响

张雨珊^{1,2}, 杨恒山^{1*}, 葛选良¹, 张瑞富¹, 张明伟^{1,3}, 高鑫¹, 李媛媛¹

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028042; 2. 兴安职业技术学院农牧系, 内蒙古 兴安盟 137400;

3. 兴安盟农牧科学研究所, 内蒙古 乌兰浩特 137401)

摘要:为探究西辽河平原浅埋滴灌下水氮减量对春玉米产量和效益的影响, 2018~2019年采用裂区设计实施田间定位试验, 分别以两年的平均产量(Y)和经济效益(Y')为因变量, 以试验设定的灌溉量(W)和施氮量(N)为自变量, 建立产量及经济效益回归模型, 并分析产量、经济效益与灌溉量、施氮量之间的互作关系。结果表明, 在试验设定的自变量范围内, 灌溉量、施氮量对产量和经济效益的提高均有促进作用, 影响程度为施氮量>灌溉量; 灌溉量、施氮量及其互作对产量和经济效益的影响均为正效应。通过产量模型寻优, 灌溉量、施氮量分别为2 372 m³/hm²、291.9 kg/hm²时, 产量最高, 可达13 097.59 kg/hm²; 通过经济效益模型寻优, 灌溉量、施氮量分别为2 344 m³/hm²、276.6 kg/hm²时, 经济效益最高, 可达15 619.93元/hm²。综合分析产量及经济效益, 西辽河平原春玉米浅埋滴灌水肥一体化栽培模式适宜灌溉量为2 344~2 372 m³/hm², 施氮量276.6~291.9 kg/hm², 在此水氮区间范围内可实现水氮高效利用, 获取较高产量可观的经济效益, 可为西辽河平原浅埋滴灌密植下春玉米种植提供一定参考。

关键词:浅埋滴灌; 水氮耦合; 玉米; 产量; 效益

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)05-0032-05

Effects of Water and Nitrogen Management on Yield and Benefit of Maize under the Shallow Buried Drip Irrigation in Xiliaohe Plain

ZHANG Yushan^{1,2}, YANG Hengshan^{1*}, GE Xuanliang¹, ZHANG Ruifu¹, ZHANG Mingwei^{1,3}, GAO Xin¹,

LI Yuanyuan¹

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028042; 2. Department of Agriculture and Animal Husbandry and Bioengineering, Xing'an Vocational and Technical College, Hinggan League 137400; 137400; 3. Hinggan League Institute of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Ulanhot 137401, China)

Abstract: In order to explore the effects of amount reduction of water and nitrogen on yield and benefit of spring maize under the shallow buried drip irrigation in Xiliaohe Plain, the regression model of yield and economic benefit were set up to analyze the interaction relations between yield, economic benefits and irrigation amount, nitrogen application using average yield (Y) and economic benefits (Y') of the two year as the dependent variable and irrigation amount (W) and nitrogen application rate (N) set by the test as independent variable by adopting split plot design to carry out field location test in 2018-2019. The results showed that irrigation amount and nitrogen application rate had a promoting effect on the increase of yield and economic benefits and the influence degree was nitrogen application rate > irrigation amount, and interaction of irrigation amount and nitrogen application rate had positive effects on yield and economic benefits within the range of independent variables set by the experiment. When the irrigation amount and nitrogen application rate were respectively 2 372 m³/ha and 291.9 kg/ha, the yield was the highest, reaching 13 097.59 kg/ha by yield model optimization; When the irrigation amount and nitrogen application rate were respectively 2 344 m³/ha and 276.6 kg/ha, the economic benefit was the largest, reaching 15 619.93 yuan/ha by economic benefit model optimization. Comprehensive yield and economic benefits, the suitable irrigation amount

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300401); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020LH03007、2019MS03073)

作者简介: 张雨珊(1997-), 女, 助教, 研究方向为玉米高产高效栽培。

通讯作者: 杨恒山, 男, 博士, 教授, E-mail: yanghengshan2003@aliyun.com

and nitrogen application amount of shallow burying drip irrigation and fertilizer integrated cultivation mode of Spring Maize in Xiliaohe Plain are 2 344–2 372 m³/ha and 276.6–291.9 kg/ha, respectively. In this range of water and nitrogen, it can achieve high efficiency of water and nitrogen utilization and obtain high yield and considerable economic benefits, which can provide certain reference for spring maize planting under the shallow buried drip irrigation and close planting in Xiliaohe Plain.

Key words: Shallow drip irrigation; Water and nitrogen management; Maize; Yield; Benefits

玉米是集粮、经、饲、加工为一体的多功能作物,其高产稳产在保障我国饲料供给、农业可持续发展与粮食安全等方面具有重要意义^[1]。西辽河平原地处世界玉米生产黄金带,是我国为数不多的井灌玉米区,玉米常年种植面积1 600万亩,单产水平较全国玉米平均单产高30%以上^[2]。近年来,受干暖化气候变化和大量灌溉用水的影响,地下水位持续下降,甚至出现了地下漏斗,水资源短缺与农业生产用水的矛盾日益突出^[3]。滴灌具有节水省肥的特点,研究表明,滴灌可维持根区较高的土壤含水量和养分含量^[4-5],保持较高冠层物质生产能力^[6-7]。同等施肥量条件下,滴灌玉米水分生产效率较常规灌溉提高0.26 kg/m³,增产420 kg/hm²^[8];同等灌溉量条件下,氮肥利用率较传统畦灌提高41.03%^[9]。浅埋滴灌技术是在膜下滴灌技术基础上形成的一种新型滴灌技术,发源于西辽河平原,具有去膜、节水、减肥、增效的功效。现有研究表明,浅埋滴灌可显著提高水分利用效率,提高玉米产量,经济效益较传统灌溉和膜下滴灌也有大幅度提高^[10-12]。定量分析浅埋滴灌下灌溉量、施氮量及其互作对玉米产量及经济效益的影响鲜见报道。本研究通过连续2年的定位试验,建立产量及经济效益的回归模型,定量

分析浅埋滴灌下灌溉量、施氮量及其互作对春玉米产量及经济效益的影响,为西辽河平原玉米浅埋滴灌水氮减量高产高效提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2018年和2019年在通辽市科尔沁区农业高新技术示范园区(122°22'E, 43°36'N)进行,试验地点海拔182 m,年平均气温6.8℃,≥10℃的活动积温3 200℃·d,无霜期154 d,年均降水量390 mm。试验年份玉米生育期内降雨量见图1,试验田土壤为灰色草甸土,是当地主要土壤类型。播前试验田0~20 cm耕层土壤基础养分情况见表1。

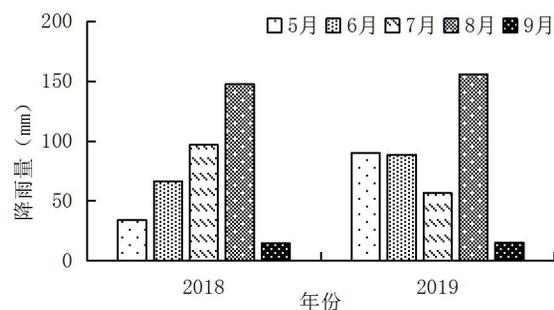


图1 2018-2019年玉米生育期降雨量

表1 播前试验田耕层土壤基础养分含量

年份	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	全氮(mg/kg)
2018	19.63	50.81	11.35	118.69	0.76
2019	20.47	53.07	11.21	77.02	0.68
平均	20.05	51.94	11.28	97.85	0.72

1.2 试验设计

试验为裂区设计,滴灌定额为主处理,分别设置传统畦灌常规灌量40%(W₁:1 600 m³/hm²)、传统畦灌常规灌量50%(W₂:2 000 m³/hm²)和传统畦灌常规灌量60%(W₃:2 400 m³/hm²)3个灌量水平;施氮水平为副处理,分别设置常规施氮量50%(N₁:150 kg/hm²)、常规施氮量70%(N₂:210 kg/hm²)和常规施氮量(N₃:300 kg/hm²)3个水平,3次重复,共27个小区,小区面积72 m²(10 m×7.2 m)。氮素供

体为尿素(含氮量为46%),结合灌溉分别在拔节期、大喇叭口期、吐丝期按3:6:1比例追施。各处理均基施磷酸二铵(18-46-0)195 kg/hm²,硫酸钾(0-0-50)90 kg/hm²。供试玉米品种为农华101,种植密度9.0万株/hm²,采用40 cm×80 cm宽窄行种植。2018年5月1日播种,10月1日测产收获;2019年5月2日播种,10月3日测产收获。根据土壤持水量灌溉7次/年,试验设计方案见表2。

表2 试验设计

编号	编码值		实施方案	
	灌溉量(W)	施氮量(N)	灌溉量(W) (m ³ /hm ²)	施氮量(N) (kg/hm ²)
1	-1	-1	1 600	150
2	-1	0	1 600	210
3	-1	1	1 600	300
4	0	-1	2 000	150
5	0	0	2 000	210
6	0	1	2 000	300
7	1	-1	2 400	150
8	1	0	2 400	210
9	1	1	2 400	300

1.3 测定项目与方法

小区测产面积为 24 m², 并将实测产量换算为 14% 含水量的产量。

表3 浅埋滴灌不同水氮减量处理玉米产量与经济效益分析

编号	处理	产量(kg/hm ²)		经济效益(元/hm ²)	
		2018	2019	2018	2019
1	W ₁ N ₁	9 061.15e	10 696.71e	8 638.01e	11 745.57e
2	W ₁ N ₂	10 860.32bc	11 421.01d	11 795.56cd	12 860.87d
3	W ₁ N ₃	11 050.28b	12 132.96c	11 765.18c	13 822.28c
4	W ₂ N ₁	9 771.51de	11 128.94de	9 927.69d	12 506.82d
5	W ₂ N ₂	12 500.48a	12 513.15bc	14 851.87a	14 875.93b
6	W ₂ N ₃	12 632.11a	12 823.82ab	14 710.66a	15 074.92ab
7	W ₃ N ₁	10 291.45cd	11 167.43d	10 855.58c	12 519.95d
8	W ₃ N ₂	12 420.62a	12 635.16abc	14 640.13ab	15 047.76ab
9	W ₃ N ₃	12 993.08a	13 115.07a	15 336.50a	15 568.29a

注: 硫酸钾 6.4 元/kg, 磷酸二铵 3 元/kg, 尿素 2 元/kg。除灌溉量、施氮量不同外, 其他管理相同。玉米价格为 1.9 元/kg, 滴灌带 900 元/hm², 人工 1 500 元/hm², 机器作业 3 000 元/hm², 农药 675 元/hm², 种子 450 元/hm²; 水费以灌溉用电量计, 1 m³ 水折合用电量 0.125 kW·h。经济效益=产量×玉米价格-水费-肥料费-其他

产效果高于灌溉量。灌溉量一定时, 除 2019 年 W₁ 灌溉量下 N₂ 经济效益显著低于 N₃ 外, 其余处理均表现为 N₂ 与 N₃ 差异不显著, 但二者均显著高于 N₁; 施氮量一定时, 除 2018 年 N₁ 下 W₂ 经济效益显著低于 W₃ 外, 均表现为 W₂ 与 W₃ 差异不显著, 但二者均显著高于 W₁。不同处理产量的年际变化一致, 均以 2019 年较高, 且以 W₁ 灌溉量的差异最明显; 不同处理经济效益的年际变化规律与产量相同。

2.2 浅埋滴灌水氮减量玉米产量回归模型的建立及效应分析

2.2.1 产量回归模型的建立

根据 2018 年和 2019 年平均产量, 建立产量 (Y) 与灌溉量 (W)、施氮量 (N) 的回归模型:

$$Y=12\ 330.39+616.70W+1\ 052.51N-407.90W^2-$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行计算, 用 DPS 软件对数据进行多元回归分析, 应用 Sigma Plot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 浅埋滴灌不同水氮减量处理玉米产量与经济效益分析

由表 3 可知, 随施氮量、灌溉量的增加, 不同处理玉米产量均呈上升的趋势, 在 N₂~N₃、W₂~W₃ 区间产量增长幅度均逐渐减小。灌溉量一定时, 除 2019 年 W₁ 灌溉量下 N₂ 产量显著低于 N₃ 外, 其余处理均表现为 N₂ 与 N₃ 差异不显著, 但二者均显著高于 N₁; 施氮量一定时, N₁ 和 N₃ 水平下 W₂ 与 W₃ 差异不显著, 但 W₃ 显著高于 W₁, 说明灌水量、施氮量对产量均有促进作用, 且施氮量对玉米的增

$$653.08N^2+152.99WN \dots\dots\dots (1)$$

模型相关系数 R²=0.994 6, F 检验结果 F_(F)=55.60>F_{0.01(5,3)}}=28.24, 表明该方程拟合性好, 能够客观反映灌溉量、施氮量与产量之间的关系。

2.2.2 产量回归模型主因子效应分析

模型(1)中灌溉量、施氮量已进行无量纲化处理, 所以偏回归系数可以直接反映灌溉量、施氮量对产量的影响程度。产量模型中一次项系数为正数, 且 N>W, 表明二者对产量的提升均有促进作用, 但施氮量对产量的影响程度大于灌溉量。二次项系数均为负数, 表明产量随着灌溉量、施氮量的增大均呈抛物线变化趋势, 影响程度为施氮量>灌溉量。交互项系数为正值, 说明灌溉量和施氮量耦合具有协同作用, 可以促进产量的提升。

2.2.3 产量回归模型单因子效应分析

为了对灌溉量、施氮量与产量的单独效应进行分析,对回归方程(1)进行降维处理,可分别得到一元二次子模型(2)和(3)。

$$\text{灌溉量: } Y=12\ 330.39+616.70W-407.90W^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{施氮量: } Y=12\ 330.39+1052.51N-653.08N^2 \dots\dots\dots (3)$$

由图2可知,灌溉量、施氮量的产量效应曲线均为抛物线,表明两因素均有增产效应且达到最大值后效应减弱,且施氮量对产量的正效应大于灌溉量。在试验范围内,最佳灌溉量编码为0.76,实际灌溉量为2 304 m³/hm²,此时产量为12 563.48 kg/hm²。最佳施氮量编码为0.81,实际施氮量为282.9 kg/hm²,此时产量为12 754.43 kg/hm²。当灌溉量、施氮量超过最佳量后,随着用量的增加,产量均呈现下降趋势。

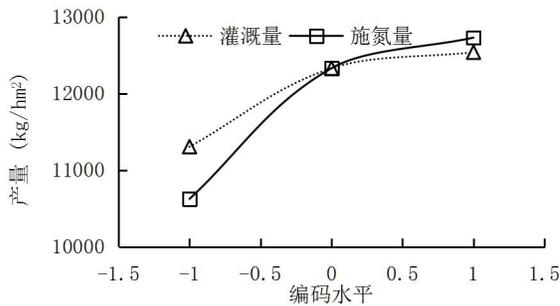


图2 产量回归模型单因子效应分析

2.2.4 产量回归模型因素间交互效应分析

由图3可知,灌溉量和施氮量的交互效应对产量的影响呈现为正凸抛物面趋势,施氮量的增产效应大于灌溉量。随着施氮量、灌溉量的增加,产量呈报酬递减趋势。随着施氮量的变化,最佳产量所对应的灌溉量也不同。当施氮量为-1(150 kg/hm²),产量在灌溉量为0.57(2 228 m³/hm²)时,取得最高值,为10 756.59 kg/hm²;当施氮量为0(210 kg/hm²),产量在灌溉量为0.76(2 304 m³/hm²)时,取得最高值为12 563.48 kg/hm²。两因素均接近1时,产量最高;当两因素为-1时,产量最低,为9 753.19 kg/hm²;当两

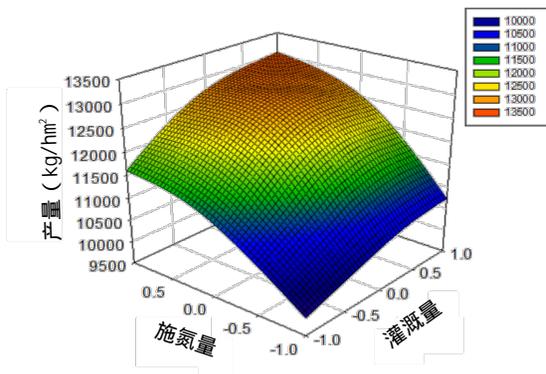


图3 产量回归模型两因子耦合效应分析

因素均为0时,产量提高至12 330.39 kg/hm²。若继续增加灌溉量、施氮量,产量迅速下降。

2.2.5 产量回归模型寻优

对产量方程(1)求偏导数,令其结果等于0,得公式(4)和公式(5):

$$\frac{\partial Y}{\partial W}=616.70+152.99N-815.80W=0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N}=1\ 052.51+152.99W-1\ 306.16N=0 \dots\dots\dots (5)$$

当 W=0.93, N=0.91 时,实际灌溉量为2 372 m³/hm²,实际施氮量为291.90 kg/hm²,产量最高为13 097.59 kg/hm²。

2.3 浅埋滴灌水氮减量玉米经济效益回归模型的建立及效应分析

2.3.1 经济效益回归模型的建立

根据2018年和2019年平均经济效益(见表3),建立经济效益(Y')与灌溉量(W)、施氮量(N)的回归模型:

$$Y'=14\ 528.69+1\ 111.73W+1\ 673.69N-775.01W^2-1\ 306.07N^2+290.67WN \dots\dots\dots (6)$$

相关系数 R²=0.993 3, F_(F)=44.02>F_{0.01(5,3)}}=28.24,表明该回归方程能够反映两因素与经济效益之间的关系,方程达极显著水平,拟合程度高。

2.3.2 经济效益回归模型的单因子效应分析

本试验已进行无量纲化处理,偏回归系数可以直接反映各因素作用的大小。从效益方程(6)可以看出,施氮量的多少对经济效益的影响较大,利用降维法得到单因子效应方程,进一步分析灌溉量、施氮量对经济效益的影响程度。

$$\text{灌溉量: } Y'=14\ 528.69+1\ 111.73W-775.01W^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{施氮量: } Y'=14\ 528.69+1\ 673.69N-1\ 306.07N^2 \dots\dots\dots (8)$$

当灌溉量、施氮量编码值均为-1时,对应经济效益分别为14 191.97元/hm²、14 161.07元/hm²;当灌溉量、施氮量编码值均为0时,对应经济效益为14 528.69元/hm²;编码值在0~1经济效益最高;当编码值均为1时,经济效益降低,分别为14 865.41元/hm²、14 896.31元/hm²。边际效应可以反映出最佳灌溉量、施氮量以及二者对经济效益增加和降低速率的影响程度。对公式(7)和公式(8)进一步一阶偏导得到灌溉量、施氮量的边际效应方程(9)(10)。

$$dy'/d_w=1\ 111.73-1\ 550.01W \dots\dots\dots (9)$$

$$dy'/d_n=1\ 673.69-2\ 612.14N \dots\dots\dots (10)$$

将编码值代入可得图4。通过斜率可知灌溉量、施氮量对经济效益的影响为施氮量>灌溉量,说明施氮量对经济效益的影响大。当施氮量编码值为

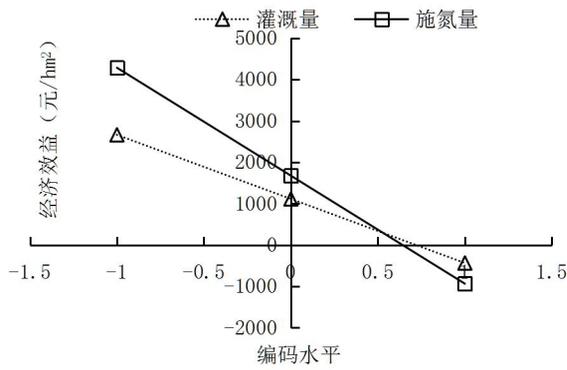


图4 经济效益回归模型边际效应分析

0.64(267.60 kg/hm²)时为最佳施用量,若继续增加经济效益降低,此时经济效益为15 064.89元/hm²。灌溉量对边际效应的影响小,但对经济效益具有一定的促进作用,最适灌溉量为编码值0.71(2 284 m³/hm²),此时经济效益为14 927.34元/hm²。

2.3.3 经济效益回归模型因素间交互效应分析

由图5可见,经济效益随灌溉量、施氮量的增加先增加后降低,曲面最高点取得效益最大值。施氮量为-1(150 kg/hm²),灌溉量为0.53(2 212 m³/hm²),经济效益最高达11 766.40元/hm²;施氮量为0(210 kg/hm²),灌溉量为0.72(2 288 m³/hm²)时,经济效益最高,为14 927.38元/hm²。灌溉量编码值为-1(1 600 m³/hm²),施氮量为0.53(257.7 kg/hm²)时,经济效益最高,为13 008.08元/hm²;灌溉量编码值为0(2 000 m³/hm²),施氮量为0.64(267.6 kg/hm²)时,效益迅速提高为15 064.89元/hm²。

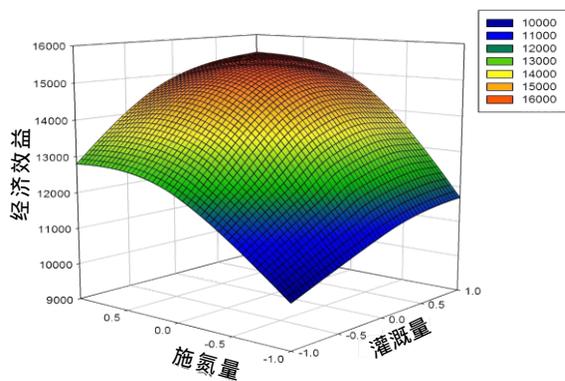


图5 经济效益回归模型两因子耦合效应分析

2.3.4 效益回归模型寻优

对经济效益方程(6)求偏导数,令其结果等于0,得公式(11)(12):

$$\frac{\partial Y'}{\partial W} = 1\ 111.73 + 290.67N - 1\ 550.02W = 0 \quad \dots (11)$$

$$\frac{\partial Y'}{\partial N} = 1\ 673.68 + 290.67W - 2\ 612.14N = 0 \quad \dots (12)$$

当W=0.86, N=0.74时,实际灌溉量为2 344 m³/hm²,实际施氮量为276.60 kg/hm²,最优经济效益为15 619.93元/hm²。

3 讨论

适宜的灌溉方式是半干旱地区玉米增产增收的重要前提和保障,合理的水、氮用量对提升玉米产量及经济效益具有一定的促进作用^[13-14]。本研究表明,在本试验范围内玉米产量和经济效益均随施氮量、灌溉量的增加而增加,二者的增幅分别在210~300 kg/hm²施氮量和2 000~2 400 m³/hm²灌溉量区间内逐渐减小且差异不显著(P<0.05)。不同灌溉量和施氮量对玉米产量的影响存在差异,研究表明,灌溉与施氮均可显著增加玉米产量,二者有明显的耦合作用且以施氮量为主效应^[9,15]。本研究中,灌溉量、施氮量及其互作对产量及经济效益均有正效应,表现为施氮量>灌溉量>二者耦合;通过回归模型分析表明,玉米产量和经济效益均随着灌溉量、施氮量的增加呈先增高后降低趋势,这与前人研究结果一致^[16]。此外,不同地区、不同灌溉方式下玉米适宜灌溉量与施氮量不尽相同。目前,滴灌条件下我国半干旱地区玉米灌溉量和施氮量大致处于400~5 750 m³/hm²和140~360 kg/hm²^[217-20]。本研究表明,灌溉量、施氮量分别为2 372 m³/hm²、291.9 kg/hm²时,玉米产量最高,可达13 097.59 kg/hm²,灌溉量、施氮量分别为2 344 m³/hm²、276.6 kg/hm²时,经济效益最高,可达15 619.93元/hm²,获得最高经济效益的水氮用量略低于获得最高产量时水氮用量。对玉米实际生产而言,灌溉量在2 344~2 372 m³/hm²,施氮量在276.6~291.9 kg/hm²范围内,可实现水氮高效利用,获取较高产量和可观的经济效益。

4 结论

浅埋滴灌下灌溉量、施氮量及其二者耦合对产量及经济效益均有促进作用,其影响程度表现为施氮量>灌溉量>二者耦合。通过模型寻优,灌溉量在2 344~2 372 m³/hm²,施氮量在276.6~291.9 kg/hm²范围内,可实现水氮高效利用,获取较高产量和可观的经济效益,对西辽河平原浅埋滴灌密植下春玉米生产具有一定参考意义。

参考文献:

[1] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等.一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J].中国农业科学,2018,51(20):3827-3839. (下转第80页)

- [12] 张舒,陈其志,吕亮,等.自然诱发条件下湖北省水稻主栽品种对稻瘟病、纹枯病的抗性鉴定[J].华中农业大学学报,2006,25(3):236-240.
- [13] 李桦,宋成艳,丛万彪,等.粳稻品种抗纹枯病抗性鉴定与筛选[J].植物保护,2000,26(1):19-21.
- [14] 过崇俭,陈志谊,王法明,等.水稻纹枯病菌 *Thanatephorus cucumeris*(Frank) Donk 致病力分化及品种抗性鉴定技术的研究[J].中国农业科学,1985(5):50-56.
- [15] 马军韬,张国民,王永力,等.黑龙江省半干旱区水稻稻瘟病及纹枯病药肥统防技术研究[J].东北农业科学,2022,47(6):70-75.
- [16] 黄世文,王玲,刘连萌,等. NY/T 2720-2015 水稻抗纹枯病鉴定技术规范[S].中国农业出版社,2015.
- [17] 左示敏,陈天晓,邹杰,等.水稻不同类群品种间的纹枯病抗性评价和抗病新种质筛选[J].植物病理学报,2014,44(6):658-670.
- [18] 刘毅.水稻纹枯病抗性遗传分析及稻种资源的抗病鉴定与评价[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [19] 潘学彪,陈宗祥,徐敬友,等.不同接种调查方法对水稻纹枯病遗传研究的影响[J].江苏农学院学报,1997,18(3):27-32.
- [20] 彭绍裘.水稻纹枯病及其防治[M].上海:上海科学技术出版社,1986:1-208.
- [21] 徐羨明,曾列先,林壁润,等.普通野生稻种质资源对纹枯病的抗性鉴定[J].植物病理学报,1992,22(4):300.
- [22] 王晓娥,邓根生,张先平,等.水稻品种对纹枯病和白叶枯病抗病性鉴定初报[J].陕西农业科学,2000(7):16-20.
- [23] 王妍,魏松红,王小哲,等.水稻主栽品种对纹枯病的抗性鉴定及评价[J].江苏农业科学,2020,48(13):125-128.

(责任编辑:刘洪霞)

(上接第36页)

- [2] 杨恒山,薛新伟,张瑞富,等.灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):69-77.
- [3] 张磊,孔丽丽,侯云鹏,等.滴灌施氮对东北春玉米物质生产、转运及氮素利用效率的影响[J].东北农业科学,2020,45(6):68-73.
- [4] 黎会仙,王文娥,胡笑涛,等.水肥一体化膜下滴灌水肥及速效氮分布特征研究[J].灌溉排水学报,2018,37(3):51-57.
- [5] 张国强,王克如,肖春华,等.滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究[J].玉米科学,2015,23(4):117-123.
- [6] 张喜军,魏廷邦,樊志龙,等.绿洲灌区水氮减施密植玉米的光合源动态和产量表现[J].核农学报,2020,34(6):1302-1310.
- [7] 杨建,侯云鹏,刘志全,等.不同栽培模式下东北春玉米产量与肥料效率的差异[J].东北农业科学,2020,45(5):33-37.
- [8] 周继华,贾松涛.不同灌溉施肥方式对春玉米产量和水分生产效率影响[J].中国农学通报,2013,29(36):224-227.
- [9] 任中生,屈忠义,李哲,等.水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):149-155.
- [10] 郭金路,谷健,尹光华,等.辽西半干旱区浅埋式滴灌对春玉米耗水特性及产量的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2514-2520.
- [11] 王建东,张彦群,龚时宏,等.覆膜浅埋滴灌技术模式田间应用试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(11):1-5.
- [12] 梅园雪,冯玉涛,冯天骄,等.玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J].玉米科学,2018,26(1):98-102.
- [13] 王士杰,尹光华,李忠,等.浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):139-147.
- [14] 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.
- [15] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3679-3686.
- [16] 李雪,尹光华,马宁宁,等.浅埋滴灌水氮运筹对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):172-178.
- [17] 尚文彬,张忠学,郑恩楠,等.水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(1):49-55.
- [18] 孙云云,刘方明,高玉山,等.吉林西部膜下滴灌水氮调控对玉米生长及水肥利用的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(11):76-82.
- [19] 冯艳春,黄日,李雪花,等.半干旱区不同补灌水量对玉米产量及水分利用效率的影响[J].东北农业科学,2020,45(6):5-7.
- [20] 戚迎龙,史海滨,李瑞平,等.膜下滴灌水氮耦合对玉米光合特性的影响[J].节水灌溉,2017(1):50-52,58.

(责任编辑:刘洪霞)