

# 不同水氮条件下垄膜沟灌玉米的产量及水分利用效应

张立勤, 杨思存, 崔云玲, 王成宝

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为明确灌水和施氮对甘肃河西走廊地区垄膜沟灌玉米产量的影响, 通过裂区试验, 研究了不同施氮量和灌溉定额下垄膜沟灌玉米的产量及水分利用效果, 结果表明, 施氮、灌水以及二者之间的交互作用对玉米产量均有重要影响。灌溉定额从 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 增加到 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 和在 0~300 kg/hm<sup>2</sup> 范围内增施氮肥, 玉米穗粒数、千粒重增加、增产显著。增加灌水和减少施氮, 玉米水分利用效率降低。其中施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌水定额为 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 处理的玉米产量及水分利用效率相对较高, 与最高产量处理施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌水定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 相比, 仅减产 0.17%, 减产差异不显著, 且水分利用效率较施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌水定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 处理提高了 11.45%, 节水 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。在河西走廊垄膜沟灌栽培条件下, 可选择施 N 300 kg/hm<sup>2</sup> 和灌水 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 为玉米的适宜氮肥用量和灌溉定额。玉米获得 15 000 kg/hm<sup>2</sup> 以上高产的适宜施氮量为 180~390 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉定额 3 720~5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 玉米; 垄膜沟灌; 施氮量; 灌溉定额; 水氮耦合; 水分利用效率

**中图分类号:** S513; S275; S147.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2021)11-0034-07

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1463.2021.11.008

## Yield and Water Utilization Effects of Corn Cultivated by Raised Bed Plastic Film Mulching and Furrow Irrigation under Different Water and Nitrogen Conditions

ZHANG Liqin, YANG Sicun, CUI Yunling, WANG Chengbao

(Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to determine the effects of irrigation and nitrogen application on the yield of corn

收稿日期: 2021-09-11

基金项目: 世界银行贷款可持续发展农业项目(GS00Z13002)。

作者简介: 张立勤(1970—), 男, 甘肃张掖人, 研究员, 主要从事作物栽培和水肥资源高效利用研究工作。Email: lqzhang1993@163.com。

- management on yield and quality of field grown green beans[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71: 243-255.
- [19] SALAH E EL-HENDAWY, ESSAM A ABD EL-LATTIEF, MOHAMED S AHMED. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 836-844.
- [20] 隋娟, 龚时宏, 王建东, 等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 148-152.
- [21] 刘啸笑, 何章, 夏冬冬, 等. 温度与土壤水分对玉米种子活力和贮藏物质转运的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6): 18-21.
- (本文责编: 杨杰)

under ridge film furrow irrigation in Hexi Corridor of Gansu Province, the yield and water use effect of corn under ridge film furrow irrigation under different nitrogen application rate and irrigation quota were studied by split plot test. The results showed that nitrogen application, irrigation and the interaction between water and nitrogen had important effects on corn yield. When the irrigation quota increased from 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> to 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and the application of nitrogen fertilizer increased in the range of 0~300 kg/hm<sup>2</sup>, the number of grains per ears of corn and 1000-grain weight also increased, and yield increased significantly. Increasing irrigation quota and reducing nitrogen application, water use efficiency of corn decreased. The yield and water use efficiency of corn treated with N 300 kg/hm<sup>2</sup> and irrigation quota of 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> were relatively higher, and the yield reduction was only 0.17% compared with that of the highest yield treated with N 300 kg/hm<sup>2</sup> and irrigation quota of 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, with no significant difference in yield reduction. Compared with N 300 kg/hm<sup>2</sup> and irrigation quota of 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, WUE increased by 11.45%, water saving 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>. Under the conditions of cultivation of raised bed covered with plastic film and furrow irrigation in the Hexi Corridor, 300 kg/hm<sup>2</sup> and 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> can be selected as the suitable nitrogen application rate and irrigation quota for corn. To obtain yield above 15 000 kg/hm<sup>2</sup> for corn, the suitable nitrogen application and irrigation quota ranges are 180~390 kg/hm<sup>2</sup> and 3 720~5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> respectively.

**Key words:** Corn; Raised bed covered with plastic film and furrow irrigation; Amount of nitrogen applied; Irrigation norm; Water coupling with nitrogen; Water use efficiency

实施水、氮科学管理是实现玉米产量提高、协同资源高效利用的重要途径<sup>[1]</sup>。高亚军等<sup>[2]</sup>研究表明, 缺水和干旱胁迫会导致玉米减产; 前人的研究显示, 增加灌水量和增施氮肥均可促使玉米增产, 并且水、氮之间存在明显的交互作用, 轻度水分胁迫下适当提高氮肥用量, 有利于提高玉米产量, 较高的土壤水分可以利用更多的有效氮<sup>[3-6]</sup>。杨蕊菊等<sup>[7]</sup>研究指出, 水分不足影响氮肥肥效发挥, 水分过多会导致氮素淋溶和作物减产。河西走廊是我国玉米高产区<sup>[8]</sup>, 玉米也是该区重要的粮食作物, 其产量水平对区内农业增效和农民增收至关重要。为追求高产, 当地玉米生产中一直沿用高水高肥灌水施肥模式<sup>[9]</sup>, 水肥利用效率不高, 浪费严重, 不仅加剧了区内原有的缺水危机, 也加大了氮素淋溶风险, 对区域生态环境安全形成潜在威胁。玉米垄膜沟灌栽培技术是针对河西走廊缺水危机发展起来的一项节水效果显著、应用前景广阔的创新技术<sup>[10-11]</sup>, 但与之相关的水肥管理研究较少, 加之已有研究成果的异地适用性有限, 对其应用的具体指导性不强, 生产中水、氮应用主要参照传统漫灌模式进行, 致使技术优势不能发挥,

在很大程度上影响了玉米生产效益。为此, 我们研究了不同施氮量和灌水定额对玉米产量和水分利用效率的影响, 旨在确定垄膜沟灌玉米在高产条件下的适宜灌水量和施氮范围, 以期创建节水减肥、环境友好的水氮协同管理模式提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2016 年 4—9 月在甘肃省高台县黑泉乡定平村进行。试验地地理位置为 99° 39' 35" E、39° 27' 59" N, 当地海拔 1 331 m, 多年平均降水量 103.2 mm, 蒸发量 1 923.4 mm, 无霜期 149 d。地下水埋深 43 m, 年变幅 1.0 m 左右。试验于 4 月 20 日播种, 9 月 25 日收获, 期间降水量 42.3 mm, 其中 ≥5mm 的有效降水量 22.2 mm。试验地耕层(0~20 cm)土壤含速效氮 69.03 mg/kg、速效磷 31.40 mg/kg、速效钾 233.50 mg/kg、全盐 0.65 g/kg, pH 8.56。

### 1.2 试验材料

供试氮肥为尿素(含 N 46%), 磷肥为重过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%), 钾肥为农用硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 51%)。指示玉米品种为武科 2 号。

### 1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为施氮量,设 4 个水平,分别为  $N_1$ , 施 N 0 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_2$ , 施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_3$ , 施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_4$ , 施 N 450 kg/hm<sup>2</sup>。副区为灌溉定额,设 3 个水平,分别为  $W_1$ , 灌溉定额为 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;  $W_2$ , 灌溉定额为 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;  $W_3$ , 灌溉定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。试验共设 12 个处理,试验小区顺序排列,3 次重复,共 36 个小区,小区面积 24 m<sup>2</sup> (4 m×6 m)。小区之间打地埂宽 50 cm。采用垄膜沟灌栽培方式,垄幅 100 cm,垄宽 60 cm,沟宽 40 cm,垄高 20 cm,用幅宽 140 cm 地膜覆盖垄面和垄沟。垄面种植 2 行玉米,行距 50 cm,株距 24 cm。氮肥 30% 做底肥,其余 40% 和 30% 分别于大喇叭口和抽雄后随水追施。各处理磷、钾肥施用量相同,播种前一次性基施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 45 kg/hm<sup>2</sup>。玉米全生育期灌水 4 次,分别在拔节期、大喇叭口期、抽雄后、灌浆中期进行,各次灌溉定额分别占灌溉定额的 20%、30%、30%、20%。用水表控制水量。

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水量 播种前、收获后及每次灌水前采用烘干法结合中子仪测定 0~120 cm 土层土壤含水量,其中 0~20 cm 土层采用烘干法测定,20~120 cm 土层用中子仪测定,测定土层依次为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 cm。

### 1.4.2 作物生育期耗水量及水分利用效率

作物生育期耗水量根据田间水分平衡方程式  $ET=P+I+G \pm \Delta W$  计算,式中  $ET$  为玉米生育期耗水量(mm);  $P$  为播种至收获期有效降水量(mm);  $I$  为生育期灌水量(mm);  $G$  为作物利用地下水量(mm),由于试验地地下水埋深 20 m 以上,因此取  $G=0$ ;  $\Delta W$  为播种至收获期 0~120 cm 土层土壤贮水量的变化(mm),具体按公式  $\Delta W=($ 播种前体积含

水量-收获后体积含水量)×1 200 mm 计算。

水分利用效率:  $WUE=Y/ET$ , 式中  $Y$  为作物籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>),  $ET$  为玉米生育期耗水量(mm)<sup>[12-15]</sup>。

1.4.3 计产和考种 收获前各试验小区分别连续取样 10 株进行常规考种,去除边垄,分小区收获计产。

### 1.5 数据处理

用 DPS 软件和 Excel 2003 软件对试验数据进行处理及相关分析。

## 2 结果与分析

2.1 施氮量和灌溉定额对玉米产量及构成因素的影响

2.1.1 施氮量对玉米产量的影响 从表 1 可以看出,增施氮肥对玉米产量影响较大,施氮量从  $N_1$  增大到  $N_3$  时玉米增产极显著,在  $N_3$  水平产量最高,分别比  $N_1$  水平和  $N_2$  水平增产 35.52%、10.60%;超过  $N_3$  水平继续增施氮肥至  $N_4$  水平时,玉米产量不再增加,产量呈下降趋势,但与  $N_3$  水平之间的差异不显著。以上结果表明,在一定范围内适度增施氮肥有利于玉米增产,过量施氮对增产不利,反而会增加生产成本,降低种植效益。因此,可选择  $N_3$  水平施氮,即 300 kg/hm<sup>2</sup> 为垄膜沟灌条件下玉米栽培的氮肥适宜施用量。

表 1 不同施氮水平的玉米产量

施氮水平	折合产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	显著水平	
		0.05	0.01
$N_1$	11 615.3	c	C
$N_2$	14 231.7	b	B
$N_3$	15 740.5	a	A
$N_4$	15 402.5	a	A

2.1.2 灌溉定额对玉米产量的影响 随灌溉定额的增加,玉米产量持续增加(表 2),在  $W_3$  水平下产量最高,但在不同范围内,增加灌溉定额对产量的作用并不相同。当灌溉水平从  $W_1$  水平增加到  $W_2$  水平时,玉米产

量极显著增加；当灌溉定额高于  $W_2$  水平继续增加时，尽管玉米产量仍呈增加趋势，但增产效果不再显著。表明在玉米生产中并不是灌水越多越好，过量灌溉对提高玉米种植效益意义不大。在垄膜沟灌栽培条件下，玉米的适宜灌溉水平为  $W_2$ ，即灌溉定额为  $4\ 500\ m^3/hm^2$ 。

表 2 不同灌溉定额的玉米产量

灌溉定额	折合产量 ( $kg/hm^2$ )	显著水平	
		0.05	0.01
$W_1$	13 645.3	b	B
$W_2$	14 433.1	a	A
$W_3$	14 664.1	a	A

2.1.3 不同水氮条件对玉米的产量表现及产量构成因素的影响 从表 3 可以看出，施氮量与灌溉定额之间存在明显的互作效应，说明施氮、灌溉定额及水氮互作对玉米的产量都有重要影响。在以上因素的共同作用下，处理  $N_3W_3$  产量最高，比其他处理增产  $0.17\% \sim 49.14\%$ ，与处理  $N_3W_2$  和  $N_4W_3$  之间

的产量差异不显著，但与其他处理之间的产量差异均达显著水平；其次为  $N_3W_2$  处理，产量略低于处理  $N_3W_3$ ，但两者差异不显著，比其他处理增产  $3.45\% \sim 48.89\%$ 。

分析水、氮因素对玉米产量构成因素的影响可以看出，适度增施氮肥有利于增加玉米的穗粒数，在  $N_3$  水平下穗粒数最高，分别比  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_4$  水平下增加 161.2、62.1、20.3 粒，继续增施氮肥至  $N_4$  水平时穗粒数不再增加。在一定的施氮范围内增加灌溉定额，玉米穗粒数也随之增加。 $N_3$  水平下玉米千粒重显著高于  $N_2$  水平和  $N_1$  水平，较  $N_2$  水平和  $N_1$  水平分别增加 11.7、29.4 g，但与  $N_4$  水平差异不显著。在一定的施氮范围内随灌溉定额增加，玉米千粒重也呈增加趋势， $W_3$  水平下千粒重显著高于  $W_1$  水平，但与  $W_2$  水平之间的差异不显著。综上所述可以看出， $N_3W_3$  处理之所以玉米折合产量最高，是因为其穗粒数和千粒重均高于其他处理。产量居第 2 位、第 3 位的  $N_3W_2$  处理和  $N_4W_3$  处理，其穗粒数和千粒重也相对较高，因而

表 3 不同水氮条件下的玉米产量及产量构成因素

施氮量	处理	千粒重 /g	穗粒数 /粒	折合产量 ( $kg/hm^2$ )
	灌溉定额			
$N_1$	$W_1$	377.1 fE	468.2 gE	12 156.5 fEF
	$W_2$	397.0 deBCDE	431.8 iF	11 096.5 fF
	$W_3$	382.5 efDE	451.6 hEF	11 593.0 fF
$N_2$	$W_1$	394.8 defCDE	530.2 fD	13 434.0 eDE
	$W_2$	403.9 bcdABCD	559.7 deC	14 717.0 cdBCD
	$W_3$	410.9 abcdABC	559.0 eC	14 544.0 cdBCD
$N_3$	$W_1$	400.7 cdeCD	591.9 bB	14 151.5 deCD
	$W_2$	417.3 abcABC	620.0 aA	16 521.0 aA
	$W_3$	426.7 aA	623.2 aA	16 549.0 aA
$N_4$	$W_1$	395.2 defBCDE	574.2 cdBC	14 839.0 cdBCD
	$W_2$	410.3 abcdABC	580.7 bcB	15 398.0 bcABC
	$W_3$	420.7 abAB	619.2 aA	15 970.5 abAB
F 值	施氮量	35.40**	594.12**	80.91**
	灌溉定额	7.11**	18.55**	8.03**
	施氮量×灌溉定额	0.79*	11.95**	4.31**

表4 不同灌水施氮处理的玉米耗水量及水分利用效率

施氮量	处理 灌溉定额	有效 降水量 /mm	贮水量(0~120 cm)		耗水量 /mm	产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	水分利用效率 /[kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)]
			播种前 /mm	收获后 /mm			
N <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	22.2	329.5	277.8	433.9	12 156.5	28.02 cCD
	W <sub>2</sub>	22.2	329.5	286.4	515.3	11 096.5	21.53 eF
	W <sub>3</sub>	22.2	329.5	298.1	593.6	11 593.0	19.53 fF
N <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	22.2	329.5	288.8	422.9	13 434.0	31.77 abAB
	W <sub>2</sub>	22.2	329.5	279.0	522.7	14 717.0	28.15 cCD
	W <sub>3</sub>	22.2	329.5	296.4	595.3	14 544.0	24.43 dE
N <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	22.2	329.5	262.8	448.9	14 151.5	31.52 bAB
	W <sub>2</sub>	22.2	329.5	271.6	530.2	16 521.0	31.16 bAB
	W <sub>3</sub>	22.2	329.5	299.9	591.8	16 549.0	27.96 cCD
N <sub>4</sub>	W <sub>1</sub>	22.2	329.5	270.1	441.6	14 839.0	33.60 aA
	W <sub>2</sub>	22.2	329.5	291.5	510.2	15 398.0	30.18 bBC
	W <sub>3</sub>	22.2	329.5	297.0	594.7	15 970.5	26.85 cDE

表现出较高的产量水平。

## 2.2 不同水氮条件对玉米水分利用的影响

随施氮量增加,玉米水分利用效率呈现先增加后降低的变化趋势(表4)。施氮量从N<sub>1</sub>水平增大到N<sub>3</sub>水平时,水分利用效率显著增加,在N<sub>3</sub>水平下达最大值,分别比N<sub>2</sub>水平、N<sub>1</sub>水平增加7.43%、31.17%。继续增施氮肥达N<sub>4</sub>水平时,水分对玉米产量的贡献力下降,水分利用效率不再增加,反呈下降趋势。增加灌溉定额尽管可促进玉米增产,但与此同时耗水量也显著增大,加之水分对产量的促进作用有限,因此水分利用效率下降。在水氮因素的共同作用下,N<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理的水分利用效率虽然低于N<sub>4</sub>W<sub>1</sub>处理、N<sub>3</sub>W<sub>1</sub>处理和N<sub>2</sub>W<sub>1</sub>处理等低灌溉定额处理,与N<sub>4</sub>W<sub>1</sub>处理差异显著,但与N<sub>3</sub>W<sub>1</sub>处理和N<sub>2</sub>W<sub>1</sub>处理之间的差异均不显著,且高于其他处理,水分利用效率比其他处理提高3.25%~59.55%。

## 2.3 垄膜沟灌玉米水氮耦合效应方程及协同管理模式

对玉米折合产量、施氮量和灌溉定额等数据通过公式 $x_i=(A_i-K)/R$ (式中: $x_i$ 为中心标

准化的数据, $A_i$ 为实际的指标值或观测值, $K$ 为中位数, $R$ 为极差)进行中心标准化处理,并对处理后的数据进行回归分析,结果表明,施氮量、灌溉定额和折合产量之间可通过回归方程 $Y=0.70813X_1+0.18686X_2-1.21912X_1^2-0.20426X_2^2+0.35062X_1X_2+0.13312$ 进行拟合( $P=0.00237$ , $R^2=0.86563$ ),其中 $Y$ 为玉米折合产量, $X_1$ 为施氮量, $X_2$ 为灌溉定额。由于方程 $P$ 值 $<0.01$ ,表明拟合效果极其显著。对以上回归方程进行寻优,结果表明,施氮量为407.85 kg/hm<sup>2</sup>,灌溉定额为5 951.1 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,玉米产量可达16 551.0 kg/hm<sup>2</sup>。由玉米产量的水氮交互效应(图1)可以看出,施氮量为180~390 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额在3 720~5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>变化时,垄膜沟灌玉米可获得15 000 kg/hm<sup>2</sup>以上的高产,尽管在390 kg/hm<sup>2</sup>基础上继续增施氮肥、或在5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的基础上提高灌溉定额,也可获得15 000 kg/hm<sup>2</sup>以上的产量,但若氮肥超过300 kg/hm<sup>2</sup>再继续增加时,玉米产量呈下降趋势,与此同时,生产成本增加。灌溉定额高于4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>再继续增加时,增产效果不再显著。综上所述,垄膜沟灌玉米

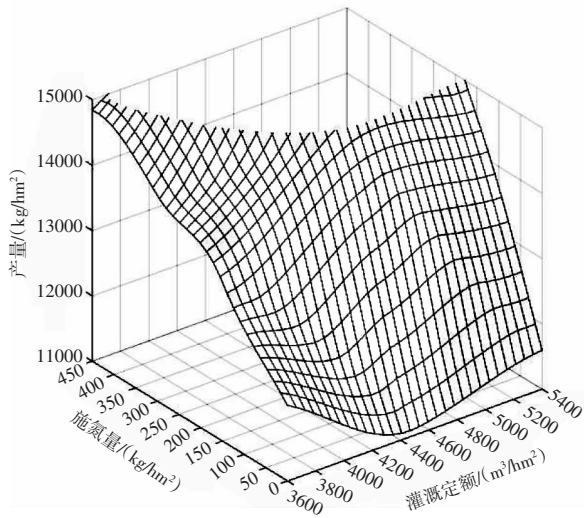


图 1 垄膜沟灌玉米产量的水氮交互效应

适宜的施氮量为 180 ~ 390 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额为 3 720 ~ 5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，在适宜的施氮量和灌溉定额条件下，玉米可获得 15 000 kg/hm<sup>2</sup> 以上的高产，水肥利用效果也相对优化。

### 3 结论与讨论

在甘肃河西走廊地区采用裂区试验方法，研究了不同施氮量和灌溉定额对垄膜沟灌玉米的产量及水分利用效果的影响。结果表明，施氮和灌水以及二者之间的互作效应对垄膜沟灌玉米产量均有重要影响。在 0 ~ 300 kg/hm<sup>2</sup> 范围内增施氮肥，有利于增加玉米穗粒数和千粒重，提高产量和水分利用效率。增加灌溉定额，玉米穗粒数、千粒重和产量均呈增加趋势，当灌溉定额从 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 增加到 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时玉米显著增产，但灌溉定额高于 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 再继续增加时增产效果不再显著。并且随着灌溉定额的增加，水分对产量的贡献力下降，玉米水分利用效率降低。对不同处理玉米产量及水氮利用效果综合比较分析可以看出，施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额为 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 的处理与最高产量处理施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 相比，虽减产 0.17%，但差异不显著，且水分利用效率较施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 处理提高了

11.45%，节水 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>；比其他处理增产 3.45% ~ 48.89%。施氮量、灌溉定额和玉米产量之间可通过回归方程  $Y=0.70\ 813X_1+0.18\ 686X_2-1.21\ 912X_1^2-0.20\ 426X_2^2+0.35\ 062\ X_1X_2+0.13\ 312$  进行拟合 ( $P=0.00\ 237$ ,  $R^2=0.86\ 563$ ，其中  $Y$  为产量， $X_1$  为施氮量， $X_2$  为灌水定额) 且拟合效果极其显著，对上方程寻优得出，垄膜沟灌条件下，玉米获得 15 000 kg/hm<sup>2</sup> 以上高产的适宜施氮范围为 180 ~ 390 kg/hm<sup>2</sup>，适宜的灌溉定额范围为 3 720 ~ 5 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

干旱缺水严重，水分供需矛盾突出一直是制约河西走廊农业发展的关键因素。土壤氮素是影响该区玉米生长的主要养分因子<sup>[9]</sup>。进行水、肥耦合研究，是实现节水减肥、发展高效、生态农业的基础。围绕水、氮因素对玉米产量的作用效果，国内外已开展大量研究，但受环境条件、栽培模式、灌水技术等诸多因素的影响，玉米产量对水氮耦合的响应也不尽相同。郭丙玉等<sup>[1]</sup>研究表明，灌水和施氮均可显著增加玉米产量，在 0 ~ 435 kg/hm<sup>2</sup> 范围内，灌溉水分生产率随施氮量升高而增加，随灌水量增加而明显下降。任中生等<sup>[16]</sup>研究认为，在施氮区间为 0 ~ 262.5 kg/hm<sup>2</sup> 时，玉米水分利用效率随施氮量的增加而升高。而本试验结果表明，在一定范围内增施氮肥和增加灌水，玉米增产显著，当施氮量高于 300 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉定额超过 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 继续增施氮肥和增加灌水，玉米增产效果不明显。在 0 ~ 300 kg/hm<sup>2</sup> 范围内增施氮肥，玉米水分利用效率提高，主要是由于增产所致，增加灌水，尽管也有利于玉米增产，但耗水量也随之增大，水分对产量的贡献力下降，玉米水分利用下降。以上结果与石多琴<sup>[17]</sup>试验结果相一致。尚文彬等<sup>[18]</sup>研究提出，黑龙江西部地区膜下滴灌玉米的最佳灌水量为 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，施氮量为 250 kg/hm<sup>2</sup>。张鹏等<sup>[9]</sup>研

究显示,武威地区冬灌后春玉米在苗期不灌水,施氮量为 $180\text{ kg/hm}^2$ 时既可保持丰产,也能提高水分利用效率。刘小刚等<sup>[6]</sup>研究指出,石羊河流域武威绿洲漫灌春玉米水氮耦合模式为施氮量 $300\text{ kg/hm}^2$ 、灌水量 $340\text{ mm}$ ,该模式既可节水增产,又可发挥氮肥最佳效应。李成等<sup>[19]</sup>研究提出适宜河套地区推广的垄膜沟灌春玉米水肥模式为灌水 $300\text{ mm}$ 、施磷酸二铵 $300\text{ kg/hm}^2$ 、施尿素 $150\text{ kg/hm}^2$ 。试验结果表明,河西走廊垄膜沟灌栽培玉米的适宜施氮量为 $300\text{ kg/hm}^2$ 、灌溉定额为 $4\ 500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,获得 $15\ 000\text{ kg/hm}^2$ 以上高产的适宜施氮量为 $180\sim 390\text{ kg/hm}^2$ ,适宜的灌溉定额为 $3\ 720\sim 5\ 100\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。试验仅研究了灌水和施氮量变化对玉米产量的作用效果,没有考虑磷素、钾素变化的影响,以及氮肥运筹和灌水分配对玉米生长的具体响应,相关研究仍有待下一步深入。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高亚军,李生秀,田霄鸿,等.不同供肥条件下水分分配对旱地玉米产量的影响[J].作物学报,2006,32(3):415-422.
- [3] 李广浩,赵斌,董树亭,等.控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(9):1406-1415.
- [4] 李广浩,董树亭,赵斌,等.不同土壤水分状况下实现夏玉米高产及氮素高效的控释尿素用量研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):579-589.
- [5] 温利利,刘文智,李淑文,等.水肥耦合对夏玉米生物学特性和产量的影响[J].河北农业大学学报,2012,35(3):18-23.
- [6] 刘小刚,张富仓,杨启良,等.石羊河流域武威绿洲春玉米水氮耦合效应[J].应用生态学报,2013,24(8):2222-2228.
- [7] 杨蕊菊,柴守玺,马忠明,等.水肥耦合对小麦玉米带田产量效应及土壤水分动态研究[J].核农学报,2011,25(5):1004-1009.
- [8] 周玉乾,寇思荣,何海军,等.甘肃省玉米产业发展现状及对策[J].甘肃农业科技,2017(9):72-75.
- [9] 张鹏,张富仓,吴立峰,等.不同灌水和施氮对河西绿洲春玉米生长、产量和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):137-143.
- [10] 张立勤,马忠明,俄胜哲.垄膜沟灌栽培对制种玉米产量和水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2007,16(4):83-86.
- [11] 王朝霞.垄作沟灌节水技术在全国推广前景广阔[J].北京农业,2010(4):76.
- [12] 吕明山,丁林,胡想全.垄膜沟灌油葵的产量及水分生产效益分析[J].甘肃农业科技,2019(2):46-49.
- [13] 杨荣洲,荆彦明,王富胜,等.施氮量和密度对党参产量及水分利用效率的影响[J].甘肃农业科技,2021,52(5):63-66.
- [14] 黄凯,何万春,权小兵,等.地面覆盖方式对马铃薯产量和水分利用效率的影响[J].甘肃农业科技,2021,52(6):4-7.
- [15] 许爱霞,李玲玲.连续施氮对半干旱地区春小麦水分利用效率的影响[J].甘肃农业科技,2019(4):56-59.
- [16] 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.
- [17] 石多琴.水氮配施对玉米水分传输和利用的互作效应[D].兰州:甘肃农业大学,2015.
- [18] 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.
- [19] 李成,冯浩,董勤各.灌溉施肥对河套灌区垄膜沟灌春玉米土壤水热运移的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):44-51.

(本文责编:郑立龙)