

# 膜下微喷灌条件下水氮耦合对制种玉米产量及水肥效应的影响

连彩云<sup>1</sup>, 马忠明<sup>2</sup>, 王智琦<sup>1</sup>, 薛亮<sup>1</sup>, 唐文雪<sup>1</sup>, 罗双龙<sup>1</sup>  
(1. 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;  
2. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 研究水氮耦合对膜下微喷灌制种玉米产量及水氮利用率的响应, 实现制种玉米高产和水氮资源的高效利用。于2022年在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站以灌水量为主处理(2 700、3 600、4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、施N量为副处理(0、120、240、360 kg/hm<sup>2</sup>), 分析了膜下微喷灌条件下不同水氮耦合模式对制种玉米产量及水肥效应的影响。结果表明, 在微喷灌溉条件下, 增加灌水量和施N量均能有效提高制种玉米籽粒产量, 但当水氮施用量达到一定程度后, 其增产效应减弱。不同的灌水量下, 施N量为240 kg/hm<sup>2</sup>的处理较其余施氮处理均明显提高了叶面积指数及光的截获率, 叶面积指数在灌浆期时较0、120、360 kg/hm<sup>2</sup>施氮处理分别高16.69%~21.12%、1.33%~2.00%、-3.79%~13.73%。在灌水量为4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施N量为240 kg/hm<sup>2</sup>的条件下, 玉米籽粒产量最高, 为7.84 t/hm<sup>2</sup>, 但与灌水量为3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施N量为240 kg/hm<sup>2</sup>的处理(7.80 t/hm<sup>2</sup>)差异不显著, 仅增产0.5%; 且后者与前者相比, 灌水量减少了20%, 水分利用效率则增加了13.50%, 氮肥农学利用效率(NAE)提高了60.91%。综上所述, 在膜下微喷灌条件下, 灌水量为3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施N量为240 kg/hm<sup>2</sup>是试验区乃至河西灌区制种玉米生产的最适宜水氮耦合模式。

**关键词:** 制种玉米; 水氮耦合; 产量; 水肥效应; 膜下微喷灌

中图分类号: S513; S147.2 文献标志码: A 文章编号: 2097-2172(2025)01-0037-08

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.01.007

## Coupling Effects of Water and Nitrogen on Seed Maize Yield and Water-nitrogen Use Efficiency under Mulched Micro-sprinkling Irrigation

LIAN Caiyun<sup>1</sup>, MA Zhongming<sup>2</sup>, WANG Zhiqi<sup>1</sup>, XUE Liang<sup>1</sup>, TANG Wenxue<sup>1</sup>, LUO Shuanglong<sup>1</sup>  
(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to determine the response of water and fertilizer coupling on the yield of seed maize under mulched micro-sprinkling irrigation, and to achieve high yield of seed maize and efficient utilization of water and nitrogen resources, a located field trial were examined on the coupling of water and nitrogen under mulched micro-sprinkling irrigation at Zhangye Water-saving Agricultural Station of Gansu Academy of Agricultural Sciences in 2022. The experiment adopted a two-factor split plot design, the two factors were the water factor (2 700, 3 600 and 4 500 m<sup>3</sup>/ha) and nitrogen factor (0, 120, 240 and 360 kg/ha), respectively, and analyzed the influence of different irrigation and nitrogen levels on the yield and the water-nitrogen use efficiency under the mulched micro-sprinkling irrigation. Results showed that under mulched micro-sprinkling irrigation, increasing the amount of irrigation and nitrogen application could effectively increase the grain yield of seed maize, but the boosting effects were weakened when the amount of water and nitrogen application reached a certain level. Under different irrigation amounts, the treatment with 240 kg/ha of nitrogen application significantly increased the leaf area index and light interception rate compared to the other nitrogen treatments. The leaf area indexes during the grain-filling stage was 16.69% to 21.12%, 1.33% to 2.00%, and -3.79% to 13.73% higher than the 0, 120, and 360 kg/ha nitrogen treatments, respectively. Under the conditions of 4 500 m<sup>3</sup>/ha irrigation amount and 240 kg/ha nitrogen application, the highest maize grain yield was 7.84 t/ha. However, no significant difference was detected compared with the treatment with 3 600 m<sup>3</sup>/ha irrigation amount and 240 kg/ha nitrogen application (7.80 t/ha), which only showed a 0.5% increase. Moreover, the latter treatment reduced irrigation by 20%, increased water use efficiency by 13.50%, and improved nitrogen agronomic efficiency

收稿日期: 2024-08-27; 修订日期: 2024-10-25

基金项目: 甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2022GAAS14、2023GAAS17)。

作者简介: 连彩云(1977—), 女, 甘肃民勤人, 副研究员, 主要从事作物节水高产栽培理论与技术的研究工作。Email: liancy1998@sina.com。

通信作者: 马忠明(1963—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 主要研究方向为农业节水高产栽培理论与技术。Email: mazh-ming@163.com。

(NAE) by 60.91% compared to the former. In conclusion, under the conditions of mulched micro-sprinkling irrigation, an irrigation amount of 3 600 m<sup>3</sup>/ha and a nitrogen application rate of 240 kg/ha is the most suitable water-nitrogen coupling model for seed maize production in the experimental area and the Hexi irrigation district.

**Key words:** Seed maize; Water-nitrogen coupling; Yield; Water-nitrogen use efficiency; Mulched micro-sprinkling irrigation

河西走廊凭借其独特的地理气候优势及丰富的光热资源，成为农业农村部首批认定的国家级制种玉米生产基地，常年播种面积在 10.0 万 hm<sup>2</sup>，约占全国玉米制种面积的 53%、甘肃省制种面积的 60%<sup>[1]</sup>。但河西走廊地区水资源严重短缺，是甘肃乃至全国最严重的缺水地区之一<sup>[2]</sup>，平均年降水量仅 200 mm，且时空分布不均。随着农田灌溉面积和规模的增加，加剧了区域水资源的压力，给制种玉米的生产带来了很大的不确定性。

水氮之间有明显的交互作用，水分亏缺会限制氮肥的肥效，水分超量则易导致氮肥淋失，从而造成作物减产<sup>[3]</sup>。因此，河西走廊地区在水资源严重短缺的条件下，采用先进的节水灌溉技术，提高水肥利用效率是该地区制种玉米节本增效的重要途径。膜下微喷灌属于微灌方式之一，主要采用细小微孔出流的方式将水均匀分布于作物根区土壤中，节水节肥效果显著，有利于养分供应均衡，改善水土环境，提高水氮的利用率<sup>[4-6]</sup>。与大田微喷带灌溉相比，膜下微喷灌可降低外界环境对土壤湿润体的影响<sup>[7-8]</sup>，提高耕作层单位面积土壤湿润体，降低灌溉水土壤垂直深层运移及增加灌溉水土壤水平运移<sup>[9]</sup>。王东等<sup>[10]</sup>研究表明，在小麦灌浆初期，微喷带灌溉可通过降低冠层温度、提高相对湿度来显著提高粒重和籽粒产量；吴祥运

等<sup>[11]</sup>研究表明，微喷补灌条件下增加目标湿润土层深度可以明显增加夏玉米株高和地上部干物质积累量；陈伟等<sup>[12]</sup>研究表明，微喷灌溉处理在玉米株高、茎粗和干物质积累方面均具有显著优势。但前人有关微喷灌的研究多集中于冬小麦、夏玉米等作物，而有关膜下微喷灌在制种玉米上的研究鲜见报道。本研究采用膜下微喷灌的灌溉方式，以制种玉米品种先玉 335 为试验材料，从灌水量和施 N 量两个方面对制种玉米生长及其水氮效应进行了研究，以探究不同灌水量和施 N 量对制种玉米生长发育、氮素利用、水分利用效率的影响及其调控机制，旨在确定膜下微喷灌条件下适宜的水氮运筹方案，以期为河西走廊地区制种玉米稳产节水栽培技术体系提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验区概况

试验于 2022 年 3—9 月在甘肃省农业科学院张掖节水试验站进行。试验地光热资源丰富，年平均日照时数 3 085 h，≥10℃积温 1 963.4~4 032.3℃。多年平均降水量 129 mm，气温 7℃。试验区土壤类型为中壤灌溉土，0~100 cm 土层土壤平均容重为 1.43 g/cm<sup>3</sup>。耕层土壤含速效氮 128.8 mg/kg、速效磷 19.3 mg/kg、速效钾 148.0 mg/kg、有机质 18.1 g/kg，pH 8.6。地下水埋深大于 100 m。玉米生育期内气象状况见图 1 所示。

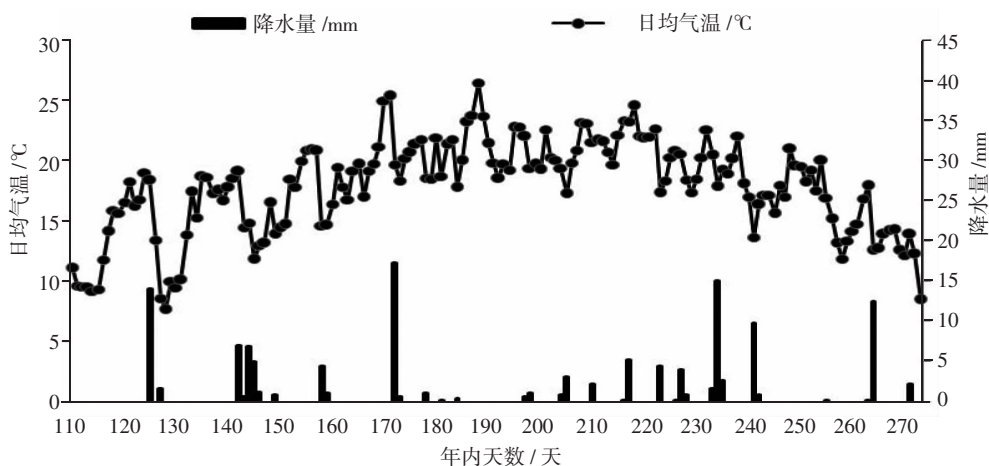


图 1 试验区 2022 年日均气温与降水量

## 1.2 供试材料

指示玉米品种为先玉 335, 由甘肃省敦煌种业股份有限公司提供。供试氮肥为尿素 (含 N 46%, 由甘肃刘家峡化工集团有限责任公司生产并提供), 供试磷肥为重过磷酸钙 (含  $P_2O_5 \geq 43\%$ , 由云南云天化国际化工股份有限公司生产并提供)。

## 1.3 试验设计

试验在膜下微喷灌条件下采用裂区设计, 主处理为滴灌量, 设 3 个水平, 分别为  $2\ 700\ m^3/hm^2$  (W1)、 $3\ 600\ m^3/hm^2$  (W2)、 $4\ 500\ m^3/hm^2$  (W3), 灌水次数与当地大田相同; 副处理为施 N 量, 设 4 个水平, 分别为  $0\ kg/hm^2$  (N0)、 $120\ kg/hm^2$  (N1)、 $240\ kg/hm^2$  (N2)、 $360\ kg/hm^2$  (N3), 共设 12 个处理。每处理重复 3 次, 小区面积  $50\ m^2$ , 小区四周设保护行。播种前将全部的磷肥和 20% 的氮肥一次性基施, 其余氮肥于拔节期、大喇叭口期、吐丝期分别追施 10%、30%、40%。各处理滴灌均采用 1 管 2 行布置模式, 每 2 行母本之间铺设 1 条微喷带, 微喷带设于膜下正中。微喷带选用薄壁斜 5 孔微喷带, 直径 28.00 mm, 微孔直径 0.80 mm, 微孔组间距 30.00 cm (图 2)。利用井水进行灌溉, 灌水量采用水表计量。

制种玉米采用等行距覆膜种植, 采用 1 膜 1 管种植 2 行模式, 膜幅宽度 100 cm, 制种玉米父母本种植比例为 1 : 4, 母本行距 50 cm、株距 18 cm, 父本株距 20 cm。授粉结束后及时割除父本。其他田间管理措施与当地大田一致。

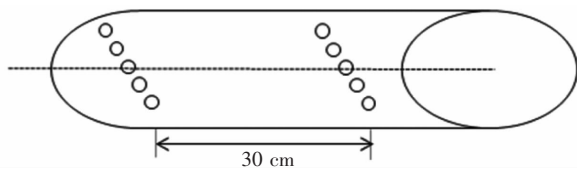


图2 微喷带喷孔示意

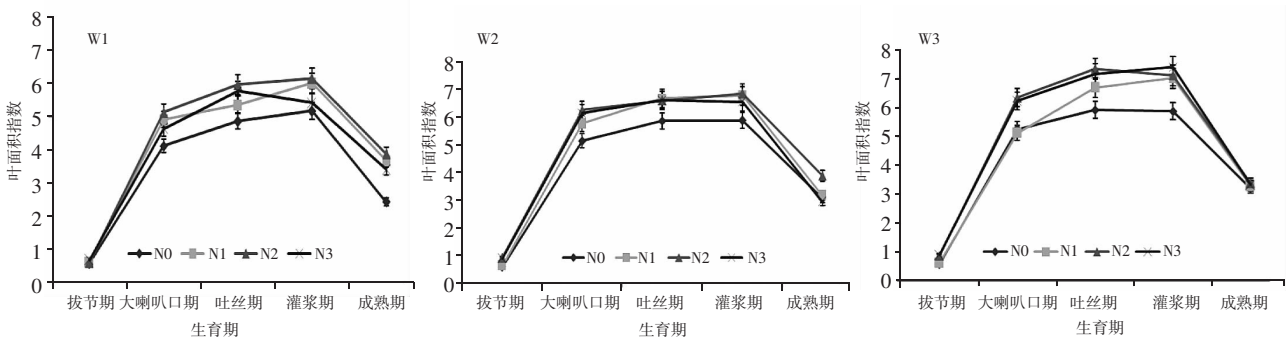


图3 不同水氮处理下玉米叶面积指数

## 1.4 测定项目和方法

1.4.1 土壤水分与硝态氮 于玉米播种及收获时用打土钻取 0 ~ 100 cm 土层土壤样品, 分别测定 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 土层土壤的水分及硝态氮含量<sup>[13-16]</sup>。

1.4.2 植株样品采集 于拔节期、大喇叭口期、吐丝期及收获期每小区随机选取 3 株植株, 测定玉米株高、叶面积指数及生物量, 并在收获期测定植株的全氮含量。株高用卷尺测量, 叶面积指数采用长宽法测定<sup>[17]</sup>, 全氮采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮-蒸馏法测定<sup>[13-16]</sup>。

1.4.3 透光率 每小区随机选取有代表性的植株 3 株, 于吐丝期用 LAI-2000 型冠层分析仪测定玉米的下层、中层、上层的光分布, 计算透光率<sup>[17]</sup>。

1.4.4 产量及产量构成 在玉米成熟期每小区连续选取植株 10 株, 用于测定穗行数、行粒数及百粒重。每小区单打单收计产, 并计算氮肥偏生产力和氮肥农学利用效率<sup>[18-19]</sup>。

氮肥偏生产力 ( $NFP$ ,  $kg/kg$ ) = 籽粒产量 / 施 N 量

氮肥农学利用效率 ( $NAE$ ,  $kg/kg$ ) = (施 N 处理籽粒产量 - 不施 N 处理籽粒产量) / 施 N 量

## 1.5 数据处理

数据统计分析采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行, 利用 Excel 2007 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 对制种玉米叶面积指数(LAI)的影响

从图 3 可看出, 随着生育期的推进, 不同水氮处理下玉米的叶面积指数均表现出相似的变化特征, 即从拔节期持续增大, 到吐丝期或灌浆期达最大值之后开始下降。在不同灌水处理条件下, N0 处理均显著低于其他施 N 处理。在灌浆期的

W1、W2 灌水量条件下，N2 处理的叶面积指数均高于其他处理，且显著高于 N0 处理；W3 灌水量条件下，N2 处理略低于 N3 处理，但显著高于 N0 处理；在 W1、W2、W3 条件下，N2 处理较 N0 处理分别高 19.11%、16.69%、21.12%，差异均达显著水平。在 W1 条件下，N2 处理较 N1、N3 处理分别高 2.00%、13.73%，差异达显著水平；在 W2 条件下，N2 处理较 N1、N3 处理分别高 1.33%、4.74%，差异达显著水平；在 W3 条件下，N2 处理较 N1、N3 处理分别高 1.43%、-3.79%，差异不显著。

2.2 对制种玉米透光率的影响

由图 4 可看出，不同水氮处理条件下玉米吐丝期群体透光率存在差异。总体来看表现为上层>中层>下层，平均透光率下层较中层和上层分别下降 65.28%和 90.21%。透光率随灌水量的增加大致呈逐渐降低趋势，W2、W3 水平较 W1 水平分别降低 4.05%、2.94%。随着施 N 量的增加表现为先降低后增加的趋势，灌水量为 W1 水平时，处理 N0 的透光率与处理 N1、N2、N3 处理相比，上层分别高出 2.35%、8.07%、6.73%，中层分别高出 2.92%、0.54%、-4.56%，下层分别高出 14.42%、23.36%、23.08%；灌水量为 W2 水平时，处理 N0 的透光率与处理 N1、N2、N3 处理相比，上层分别高出 1.22%、37.70%、19.98%，中层分别高出 17.61%、20.11%、7.50%，下层分别高出 15.07%、40.82%、20.65%；灌水量为 W3 水平时，处理 N0 的透光率与处理 N1、N2、N3 处理相比，上层分别高出 8.12%、15.23%、11.23%，中层分别高出 1.48%、2.56%、-0.94%，下层分别高出 -4.59%、9.23%、-7.89%。综合分析表明，W2N2 处理能显

著提高光的截获率，增加了玉米植株对光的利用能力。

2.3 对制种玉米产量及产量构成因素的影响

由表 1 可以看出，灌水量对制种玉米籽粒产量的影响达极显著水平，施 N 量对制种玉米籽粒产量和穗粒数的影响达极显著水平，水分与氮肥互作效应对制种玉米的籽粒产量及穗粒数均影响达显著水平，但对百粒重无显著性影响。进一步分析表明，不同灌水量水平之间籽粒平均折合产量差异表现不一，中灌水量(W2)与高灌水量(W3)之间差异不显著，均显著高于低灌水量(W1)；同一灌水量下不同施 N 水平对籽粒平均折合产量及其构成因素的表现有差异，在低灌水量(W1)、中灌水量(W2)条件下，N1、N2、N3 处理的百粒重、穗粒数和籽粒平均折合产量与 N0 处理之间均存在显著差异，其中 W1N1、W1N2、W1N3 处理较 W1N0 处理分别增产 22.6%、98.0%、67.6%，W2N1、W2N2、W2N3 处理较 W2N0 处理分别增产 27.1%、31.3%、11.8%。在高灌水量(W3)条件下，不同施 N 量水平的百粒重和穗粒数与 N0 处理差异不显著，但籽粒平均折合产量均与 N0 处理存在显著差异，W3N1、W3N2、W3N3 处理较 W3N0 处理分别增产 18.9%、30.2%、17.3%。在低灌水量(W1)条件下，N2、N3 处理与 N1 处理相比，籽粒平均折合产量差异达显著水平，而在中灌水量(W2)、高灌水量(W3)条件下各施 N 处理间籽粒平均折合产量差异不显著。同一灌水量下，制种玉米籽粒平均折合产量随施 N 量的增加呈先增大后减小趋势，籽粒平均折合产量最高均出现在 N2 处理水平下。同一施 N 量下，随灌水量的增加籽粒平均折合产量呈逐渐增大趋势，虽然高灌水量

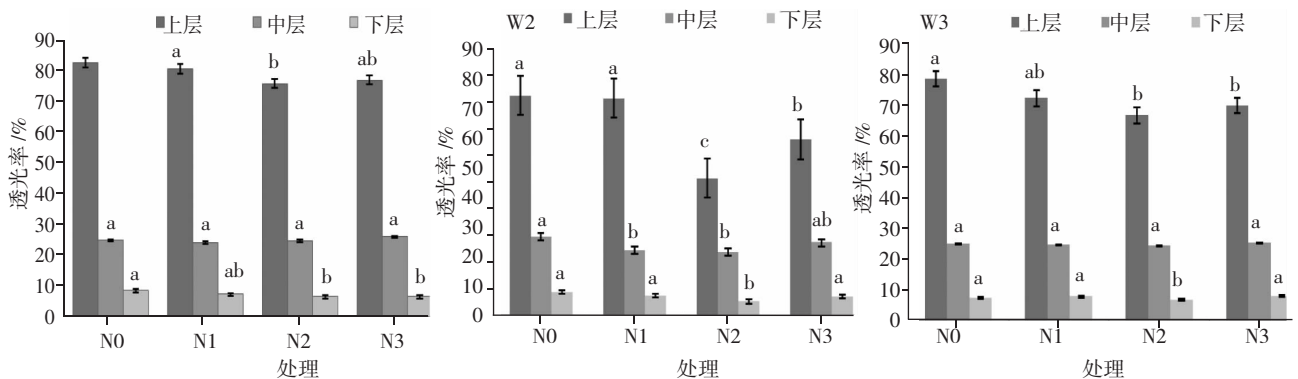


图 4 不同水氮处理下玉米吐丝期群体透光率

表 1 不同水氮处理制种玉米的籽粒产量及产量构成因素

处理		穗粒数 /粒	百粒重 /g	平均折合产量 /(t/hm <sup>2</sup> )
灌水量	施N量			
W1	N0	90.96±8.43 c	23.55±2.14 b	3.49±0.07 c
	N1	138.54±12.42 b	33.08±1.33 a	4.28±0.41 b
	N2	206.24±19.91 a	39.43±3.75 a	6.91±0.42 a
	N3	187.69±17.47 ab	35.00±0.98 a	5.85±0.47 a
W2	N0	187.30±14.21 b	32.12±0.63 b	5.94±0.55 c
	N1	245.80±18.31 a	35.62±3.34 a	7.55±0.55 a
	N2	256.87±17.97 a	35.52±1.27 a	7.80±0.46 a
	N3	235.09±16.33 a	33.03±1.96 a	6.64±0.37 ab
W3	N0	268.67±21.53 a	29.10±2.62 a	6.02±0.51 c
	N1	260.89±19.61 a	30.59±3.04 a	7.16±0.68 ab
	N2	277.65±13.31 a	33.02±2.66 a	7.84±0.61 a
	N3	227.67±21.48 a	36.28±0.99 a	7.06±0.69 ab
显著性检验(P值)				
水分		0.0882	0.0259	0.0019
氮肥		<0.0001	0.0436	<0.0001
水分×氮肥		0.0318	0.9788	0.0429

(W3) 处理的玉米籽粒平均折合产量较中灌水量 (W2) 处理的略高, 但增产不显著。但水分、氮肥配合存在一定的上限, 产量有其最大值, 超过这一限度, 将会产生负效应。在所有水氮处理中, 以 W3N2 处理的籽粒平均折合产量最高, 达 7.84 t/hm<sup>2</sup>, 但与 W2N2 处理 (7.80 t/hm<sup>2</sup>) 差异不显著, 仅增产 0.5%, 且 W2N2 处理较 W3N2 处理灌水量却减少了 20%。

总体来看, 从方差分析结果可知, 施 N 量对穗粒数和产量的影响显著优于灌水量, 施 N 能显著提升玉米产量及产量构成, 其中穗粒数和百粒重差异是引起各处理间产量差异的主要因素。

#### 2.4 对制种玉米水氮利用率的影响

2.4.1 水分利用效率 (WUE) 从表 2 可以看出, 水分利用效率表现趋势基本相同, 灌水量、施 N 量处理之间存在一定差异, 施 N 量间有极显著差异, 水分×氮肥互作效应差异显著。在同一施 N 水平下, 水分利用效率在 N0、N1、N2 水平时均随灌水量的增大呈先增加后降低的趋势, 在 N3 水平时随灌水量的增大呈逐渐降低的趋势, 且 W2

处理的平均水分利用效率显著高于 W1、W3 处理。对比同一灌水量下不同施 N 水平, 在低灌水量 (W1) 条件下, 水分利用效率随施 N 量的增大呈增加的趋势, 在中灌水量 (W2)、高灌水量 (W3) 条件下, 水分利用效率随施 N 量的增大呈现先升高后降低的趋势, 均在 N2 处理时最大。与 N0、N1、N3 处理相比, 在中灌水量 (W2) 条件下, N2 处理的水分利用效率分别增加了 30.02%、3.98%、16.30%; 在高灌水量 (W3) 条件下, N2 处理的水分利用效率分别增加了 29.30%、24.36%、7.47%。由此可见, 各处理以 W2N2 处理水分利用效率最高, 为 16.98 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), 较同水平施 N 条件下的 W1N2、W3N2 处理分别增加 21.03%、13.50%。

2.4.2 氮肥偏生产力 (NFPF) 从表 2 可以看出, 在同一灌水量下各施 N 处理间的氮肥偏生产力 (NFPF) 差异表现不一, 中灌水量 (W2)、高灌水量 (W3) 处理与低灌水量 (W1) 处理相比, 平均氮肥偏生产力达显著水平, 且在同一灌水量下, 均表现为 N1 水平的 NFPF 显著高于其他施 N 水平。同一施 N 量下, NFPF 在 N1 水平时均随灌水量的增大

表 2 不同水氮处理制种玉米的水氮利用情况

处理		水分利用效率	氮肥偏生产力	氮肥农学利用效率
灌水量	施 N 量	/[kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)]	/(kg/kg)	/(kg/kg)
W1	N0	9.34 b		
	N1	11.53 b	35.65 a	1.05 b
	N2	14.03 a	28.80 b	11.50 a
	N3	14.94 a	16.26 c	4.73 b
W2	N0	13.06 b		
	N1	16.33 ab	62.94 a	13.40 a
	N2	16.98 a	32.51 b	7.74 b
	N3	14.60 ab	18.44 c	1.93 c
W3	N0	11.57 a		
	N1	12.03 a	59.64 a	3.93 a
	N2	14.96 a	32.66 b	4.81 a
	N3	13.92 a	19.62 c	1.05 b
显著性检验(P 值)				
水分		0.040 8	0.005 9	0.412 5
氮肥		<0.000 1	<0.000 1	0.045 9
水分×氮肥		0.012 2	0.003 9	0.258 5

呈先升高后降低的趋势,在 N2、N3 水平时随灌水量的增加呈增大趋势。高、中氮处理以 W3N2 的 NFP 最高,为 32.66 kg/kg,较同水平施 N 条件下的 W2N2、W1N2 分别增加 0.46%、13.40%。

2.4.3 氮肥农学利用效率 (NAE) 从表 2 可以看出,低灌水量(W1)、中灌水量(W2)处理平均氮肥农学利用效率显著高于高灌水量(W3)处理,且平均 NAE 表现出随灌水量的增加呈先增加而后减小的趋势。W2 处理条件下平均 NAE 较 W1、W3 处理条件分别提高了 33.51%、135.89%,且与 W3 处理达显著差异水平。高、中氮处理以 W2N2 的 NAE 最高,为 7.74 kg/kg,较同水平施 N 条件下的 W1N2、W3N2 分别增加 -30.70%、60.91%。

### 3 讨论与结论

水和肥是作物生长过程中最主要的两个影响因子,其相互影响,相互制约。合理的水分有利于氮素的吸收利用,合理的氮素施用促进水分的协同提高<sup>[20-21]</sup>。在作物生长过程中,合理的水氮耦合显著促进作物的生长发育。叶面积是影响植株光合作用的重要因子,与作物生物量和产量均

有很高的相关性<sup>[22-23]</sup>。窦超银等<sup>[24]</sup>研究表明,在降水量较小或干旱发生年份采用微喷带进行灌溉有利于提高玉米叶面积指数。本研究中,灌水量为 2 700、3 600、4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时,以施 N 240 kg/hm<sup>2</sup> 处理的叶面积指数在灌浆期较施 N 0 kg/hm<sup>2</sup> 处理分别高 19.11%、16.69%、21.12%,差异显著;较施 N 120 kg/hm<sup>2</sup> 处理分别高 2.00%、1.33%、1.43%,较施 N 360 kg/hm<sup>2</sup> 处理分别高 13.73%、4.74%、-3.79%。表明适当的水氮可以显著提高玉米的叶面积指数,但增加到一定程度后其影响效应减弱。玉米吐丝期群体透光率的变化与叶面积指数一致,灌水量 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施 N 量 240 kg/hm<sup>2</sup> 的处理显著提高了光的截获率,增加了作物对光的利用能力。

作物获得高产的最有效途径是合理的灌水量和施肥量<sup>[25-28]</sup>。研究已证实,在膜下滴灌条件下水肥各减少 25%,夏玉米产量可提高 2.8%,肥料利用率则提高了 28.55%<sup>[29]</sup>。众多研究也表明,微喷灌可提高灌溉水均匀性,与传统大田漫灌相比可节水 49%,提高了水分的利用率<sup>[30-31]</sup>。董志

强等<sup>[32]</sup>研究认为, 与畦灌相比, 在同等冬小麦产量水平下, 微喷灌在平水年可节水 20~50 mm。Zhang 等<sup>[33]</sup>研究表明, 灌水量减少 10%, 玉米产量无显著变化, 但蒸散量有所降低, 水分利用效率可提高 4.61%~6.66%。以上研究均与本研究结果一致, 本试验结果表明, 以灌水量 4 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施 N 量 240 kg/hm<sup>2</sup> 的水氮耦合处理玉米籽粒折合产量最高, 为 7.84 t/hm<sup>2</sup>, 但与灌水量 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施 N 量 240 kg/hm<sup>2</sup> 的水氮耦合处理(7.80 t/hm<sup>2</sup>)差异不显著, 仅增产 0.5%; 且后者与前者相比, 灌水量减少了 20%, 水分利用效率增加了 13.50%, 氮肥农学利用效率提高了 60.91%。说明合理的水氮施用量可显著提高制种玉米的水氮利用效率。

总体来看, 膜下微喷灌水肥一体化条件下, 增加灌水量和施 N 量对制种玉米产量、水氮利用效率、叶面积指数和透光率均有很好的促进作用, 但当灌水量和施 N 量增加到一定的区间后, 促进效应不明显或减小。综合考虑产量、水氮利用效率等因素, 认为膜下微喷灌条件下河西灌区制种玉米适宜的水氮耦合模式是灌水量为 3 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、施 N 量为 240 kg/hm<sup>2</sup>, 该模式是河西灌区制种玉米实现节水高产最优组合方案。

#### 参考文献:

- [1] 他霞. 河西走廊玉米制种产业发展问题及对策浅析[J]. 热带农业工程, 2023, 47(4): 60-63.
- [2] 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[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 144-152.
- [3] GAN Y T, LAFOND G P, MAY W E. Grain yield and water use: relative performance of winter vs. spring cereals in east-central Saskatchewan[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2000, 80(3): 533-541.
- [4] ZHANG M, LU Z, BAI Q, et al. Effect of microsprinkler irrigation under plastic film on photosynthesis and fruit yield of greenhouse tomato[J]. Journal of Sensors, 2020, 2020: 1-14.
- [5] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015(4): 14-19; 63.
- [6] 王锐, 孙权. 基于水肥一体化的酿酒葡萄高效栽培与效益分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 115-121.
- [7] LI J, WANG Y, ZHANG M, et al. Optimized micro-sprinkling irrigation scheduling improves grain yield by increasing the uptake and utilization of water and nitrogen during grain filling in winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 59-69.
- [8] MAN J, WANG D, WHITE P J. Photosynthesis and dry-mass production of winter wheat in response to micro-sprinkling irrigation[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(2): 549-561.
- [9] DEL VIGO Á ZUBELZU S, JUANA L. Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 83: 371-385.
- [10] 王东, 徐学欣, 张洪波, 等. 微喷带灌溉对小麦灌浆期冠层温湿度变化和粒重的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1564-1574.
- [11] 吴祥运, 王东, 蔡晓, 等. 微喷补灌对夏玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 30-37.
- [12] 陈伟, 吴奇, 迟道才, 等. 辽宁南部地区玉米微喷控水灌溉试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(2): 238-244.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版, 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 宁夏不同生态类型区土壤养分状况比较分析[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(5): 434-440.
- [16] 赵泽普, 薛亮, 马忠明, 等. 甘肃省西甜瓜主产区土壤养分评价[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(12): 1133-1139.
- [17] 兰天娇, 张晓龙, 贺明, 等. 增密、少耕与化控耦合对玉米产量及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(5): 64-73.
- [18] RICCETTO S, DAVISA S, GUAN K, et al. Integrated assessment of crop production and resource use efficiency indicators for the U. S. Corn Belt[J]. Global Food Security, 2020, 24: 100339.
- [19] VANLAUWE B, KIHARA J, CHIVENGE P, et al. Agro-nomic use efficiency of N fertilizer in maize based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management[J]. Plant Soil, 2011, 339: 35-50.
- [20] 邵立杰. 水氮互作对夏玉米氮素利用效率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [21] 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.
- [22] 麻雪艳, 周广胜. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2596-2603.
- [23] 吕 鹏, 张吉旺, 刘 伟, 等. 施 N 时期对高产夏玉米光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 576-585.
- [24] 窦超银, 孟维忠. 压片式微喷带补充灌溉对玉米生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 1-5.
- [25] WANG H Y, ZHANG Y T, CHEN A Q, et al. An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the North China Plain considering yield and environment effects[J]. *Field Crops Research*, 2017, 207: 52-61.
- [26] CHILUNDO M, JOEL A, WESSTRÖM I, et al. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi arid loamy sandy soil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200: 143-162.
- [27] 蔡子文, 赵朔阳, 刘彬汉, 等. 水氮耦合对河西地区西瓜成熟期生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 364-370.
- [28] 陈 伟, 李天乐, 支金虎, 等. 我国梨主产区不同施氮量对产量的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(11): 1068-1073.
- [29] 李金鑫, 余 鹏, 李明珠, 等. 滴灌下水肥耦合对夏玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 山东化工, 2017, 46(11): 53-54.
- [30] LIU Z, GAO J, GAO F, et al. Late harvest improves yield and nitrogen utilization efficiency of summer maize [J]. *Field Crops Research*, 2019, 232: 88-94.
- [31] WANG X P, HUANG G H, YANG J S, et al. An assessment of irrigation practices: Sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 197-208.
- [32] 董志强, 张丽华, 李 谦, 等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特征[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 725-733.
- [33] ZHANG G Q, LIU C W, XIAO C H, et al. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 137-146.