

文章编号:1673-887X(2026)06-0220-05

密植与水氮耦合对制种玉米产量的影响

杜健,孙宁科,何淑萍,王兴,邹悦,王娟,贾改秀,李佳丽,缪纯庆

(张掖市农业科学研究院,甘肃 张掖 734000)

摘要 为探究密植与水氮耦合对制种玉米产量及其形成过程的影响,本研究采用三因素正交设计,设置3个灌水水平、3个施氮水平和3个种植密度,系统分析了不同处理对制种玉米农艺性状、干物质积累量、产量构成要素和产量的调控效应。结果表明: $W_2N_1D_3$ 处理行粒数和单穗质量均处于较高水平,且产量达到最高,为 $687.95\text{ kg}/667\text{ m}^2$,显著高于 $W_3N_2D_1$ 处理和 $W_2N_0D_1$ 处理。建议灌水量 $250\text{ m}^3/667\text{ m}^2$ 、施氮量 $15\text{ kg}/667\text{ m}^2$ 、密度 $8\ 500\text{ 株}/667\text{ m}^2$ ($W_2N_1D_3$),可实现张掖市制种玉米的高产与高效同步目标。

关键词 制种玉米;密植;水氮耦合;产量

中图分类号 S513

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.075

The Effects of Intensive Planting and Water-nitrogen Coupling on the Yield of Seed Maize

Du Jian, Sun Ningke, He Shuping, Wang Xing, Zou Yue, Wang Juan, Jia Gaixiu, Li Jiali, Miao Chunqing

(Zhangye Agricultural Science Research Institute, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: To investigate the effects of close planting and water-nitrogen coupling on the yield of seed maize and its formation process, a three-factor orthogonal design was employed in this study, with three irrigation levels, three nitrogen application levels, and three planting densities. The regulatory effects of different treatments on agronomic traits, dry matter accumulation, yield components, and yield of seed maize were systematically analyzed. The results showed that different treatments had varying effects on agronomic traits, dry matter accumulation, yield components, and yield of seed maize. Among them, the $W_2N_1D_3$ treatment exhibited relatively high levels of kernels per row and single ear weight, and achieved the highest yield of $687.95\text{ kg}/667\text{ m}^2$, which was significantly higher than those of the $W_3N_2D_1$ and $W_2N_0D_1$ treatments. It was recommended that in this region, an irrigation amount of $250\text{ m}^3/667\text{ m}^2$, nitrogen application rate of $15\text{ kg}/667\text{ m}^2$, and planting density of $85\ 000\text{ plants}/667\text{ m}^2$ ($W_2N_1D_3$) be adopted to achieve both high yield and high efficiency in seed maize production.

Key words: seed maize; planting density; water-nitrogen coupling; yield

张掖市是全国面积最大的市级玉米制种基地,近年来,张掖玉米制种面积常年稳定在100万亩(1亩= 667 m^2 ,下同)左右,产种 $4.2\times 10^8\text{ kg}$,玉米制种面积占全国总制种面积的42%。由于地处西北干旱、半干旱区,水资源匮乏依然是影响张掖市玉米制种产业可持续发展的重要因素。玉米制种生产中多采用传统的大肥、大水投入来提高产量,导致水资源和肥料浪费严重^[1]。玉米生长发育过程中,水氮是重要的因素,适宜的水氮运筹对玉米干物质积累作用及产量形成影响显著^[2]。同时,在水肥耦合模式下,合理的种植密度可以有效改善玉米对水、肥资源的利用状况,也是玉米增产

的重要途径之一^[3]。相关研究表明,水氮耦合与种植密度对玉米的光合特性、干物质积累及产量形成具有显著的互作效应,适宜的水氮密度组合能够协调营养生长与生殖生长的关系,实现高产目标^[4-5]。因此,明确水、氮、密度互作规律对玉米制种高产优质具有重要指导意义^[6]。本研究通过适度调控灌水量、施氮量与种植密度,明确三者之间的协同互利规律,阐明水、氮、密度对玉米制种产量构成要素的响应机制,构建适合张掖地区玉米制种中的灌水量、施氮量以及种植密度三因素组合,以期河西走廊玉米制种密植高产、高效水肥管理提供技术支撑。

收稿日期 2025-08-07

基金项目 甘肃省青年科技基金(24JRRC013);国家重点研发计划(2023YFD2301105);甘肃省农业科学院院级科研计划(2024GAAS014);张掖市市级科技计划(ZY2025BJ37)。

作者简介 杜健(1991-),男,甘肃陇西人,硕士,农艺师,研究方向为土壤肥料研究。

通信作者 缪纯庆, E-mail: 363576645@qq.com。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米为制种玉米组合QL2405;滴灌设备由大禹节水集团股份有限公司提供;供试基肥为尿素、重过磷酸钙、硫酸钾;追肥氮肥为滴灌纯氮肥,磷肥为水溶性磷酸一铵,钾肥为滴灌硫酸钾,无氮区施用磷酸二氢钾。肥料养分分配及生产企业等信息见表1。

表1 供试肥料信息表

Tab.1 Information of tested fertilizers

品名	养分分配 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	总养分/%	生产企业
尿素	46-0-0	46.0	史丹利
磷酸一铵	12-61-0	73.0	史丹利
硫酸钾	0-0-52	52.0	史丹利
磷酸二氢钾	0-52-34	86.0	新大弓农化
滴灌纯氮肥	45.5-0-0	45.5	新大弓农化
水溶性磷酸一铵	12-61-0	73.0	新大弓农化
滴灌硫酸钾	0-0-52	52.0	新大弓农化

1.2 试验地概况

试验设置在甘肃省张掖市甘州区党寨镇下寨村(38°51'27"N,100°31'29"E),此村位于河西走廊中部平川灌区,海拔为1 457.5 m,年均气温7℃左右,10℃活动积温1 837~2 870℃,无霜期165 d,年均降水量127 mm,主要集中在7月—10月,年均蒸发量2 345 mm。供试土壤为典型灌漠土,质地中壤,属于灌淤旱耕人为土,土壤基础理化性质见表2。

表2 土壤基础理化性质表

Tab.2 Basic physical and chemical properties of soil

项目	pH值	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾)/(mg·kg ⁻¹)
参数	8.16	19.60	1.10	12.30	154.00

1.3 试验设计

试验采用正交设计,设计灌水量、施氮量、种植密度3个因素,灌水量(W)设:220 m³/667 m²(W₁)、250 m³/667 m²(W₂)、280 m³/667 m²(W₃)3个水平;施氮量(N)设:15 kg/667 m²(N₁)、20 kg/667 m²(N₂)、25 kg/667 m²(N₃)3个水平;种植密度(D)设:6 500株/667 m²(D₁)、7 500株/667 m²(D₂)、8 500株/667 m²(D₃)3个水平。试验另设3个不施肥对照(种植密度6 500株/667 m²),共设置12个处理,每个处理3次重复,小区面积108 m²(6 m×18 m),共36个小区,各小区随机排列。试验区四周设置保护行,小区之间设1.5 m宽缓冲区,用于布设管道和防止小区间水肥互串。玉米覆膜平作,宽窄行种植,窄行40 cm、宽行60 cm,行比种植(父本:母本=

1:7)。具体试验设计方案见表3。

表3 试验设计方案表
Tab.3 Experimental design scheme

处理	实施方案		
	W/[m ³ · (667 m ²) ⁻¹]	N/[kg· (667 m ²) ⁻¹]	D/[株· (667 m ²) ⁻¹]
W ₁ N ₁ D ₁	220	15	6 500
W ₁ N ₂ D ₃	220	20	8 500
W ₁ N ₃ D ₂	220	25	7 500
W ₂ N ₁ D ₃	250	15	8 500
W ₂ N ₂ D ₂	250	20	7 500
W ₂ N ₃ D ₁	250	25	6 500
W ₃ N ₁ D ₂	280	15	7 500
W ₃ N ₂ D ₁	280	20	6 500
W ₃ N ₃ D ₃	280	25	8 500
W ₁ N ₀ D ₁ (CK ₁)	220	0	6 500
W ₂ N ₀ D ₁ (CK ₂)	250	0	6 500
W ₃ N ₀ D ₁ (CK ₃)	280	0	6 500

1.4 水肥管理

试验采用膜下滴灌方式,滴灌带处于2行玉米中间,1条滴灌带控制2行玉米。施肥采用基肥+水肥一体化追施模式,结合玉米生育期随水追施;磷、钾肥总量的50%基施,20%于拔节期随水追施,30%于抽雄期随水追施。供试氮、磷、钾肥均为水溶性肥料,其中磷肥(P₂O₅)施用量为6 kg/667 m²,钾肥(K₂O)施用量为5 kg/667 m²。玉米生育期滴灌8次、随水施肥6次。各试验小区灌溉制度设计见表4,施肥制度见表5。

表4 试验区玉米滴灌水肥耦合灌水试验设计表

Tab.4 Experimental design of drip irrigation water-fertilizer coupling for maize in the experimental area

单位:m³/667 m²

试验 小区	灌水时期								合计
	播种 期	拔节 期	喇叭 口期	抽雄 期	开花 期	吐丝 期	灌浆 期	乳熟 期	
1—3、10	30	25	30	30	30	30	30	15	220
4—6、11	30	30	35	35	35	35	35	15	250
7—9、12	30	35	40	40	40	40	40	15	280

表5 试验区玉米滴灌水肥耦合施肥试验设计表

Tab.5 Experimental design of drip irrigation fertilization for maize in the experimental area

单位:kg/667 m²

试验 小区	基肥	追肥时期						合计
		拔节 期	喇叭 口期	抽雄 期	开花 期	吐丝 期	灌浆 期	
1、4、7	6	2	2.5	1	1.5	1	1	15
2、5、8	6	3	3.9	1.6	2.3	1.6	1.6	20
3、6、9	6	4	5.3	2.2	3.1	2.2	2.2	25

1.5 测定项目与方法

1.5.1 农艺性状

在制种玉米成熟期,每小区选取有代表性的植株5株,采用便携式叶绿素仪测定穗位叶的SPAD值;使用卷尺测定植株自然高度和果穗穗位高;采用数显游标卡尺测定茎粗。每项指标重复测定3次,取平均值。

1.5.2 干物质积累量

在制种关键生育期(拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期),每小区选取有代表性的植株3株,分器官(茎、叶、穗等)装入信封,于105℃下杀青30 min,然后于80℃烘干至恒重,称量干物质质量,并计算单株干物质积累量。

1.5.3 产量及产量构成要素

在制种玉米成熟期,各小区单收计产,并随机选取

10个果穗进行考种。采用卷尺测定穗长(果穗基部至顶端长度)和秃尖长(果穗顶端未结实部分长度);用数显游标卡尺测定穗粗(果穗中部直径);统计穗行数、行粒数;称量单穗质量(自然风干后);将果穗脱粒后,随机选取1 000粒称重,重复3次,计算千粒质量。各小区单独收获、脱粒、晾晒,按14%标准含水量折算小区产量。

1.6 数据统计

用Microsoft Excel 2010软件进行数据整理,采用SPSS 20.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对植株农艺性状的影响

不同处理植株农艺性状见表6。

表6 不同处理下植株农艺性状表
Tab.6 Agronomic traits of plants under different treatments

处理	SPAD值	株高/cm	茎粗/mm	穗位高/cm
W ₁ N ₃ D ₂	61.18 ± 1.59abcd	223.67 ± 1.53bcdef	28.34 ± 0.71abcd	109.13 ± 4.75abcde
W ₁ N ₁ D ₁	61.55 ± 1.05abcd	232.33 ± 5.51abc	28.60 ± 1.54abc	106.07 ± 6.51bcde
W ₁ N ₀ D ₁	60.56 ± 2.21abcd	222.00 ± 5.00bcdef	26.53 ± 0.64cdefg	104.47 ± 5.58cde
W ₁ N ₂ D ₃	59.81 ± 2.50bcd	228.00 ± 2.65abcde	26.58 ± 0.30cdefg	106.07 ± 10.61bcde
W ₂ N ₀ D ₁	61.20 ± 3.20abcd	221.33 ± 11.93cdef	25.74 ± 1.00efg	105.00 ± 6.12cde
W ₂ N ₃ D ₁	61.45 ± 2.96abcd	224.67 ± 7.09bcdef	28.24 ± 1.25abcd	105.40 ± 4.67cde
W ₂ N ₂ D ₂	59.72 ± 4.76cd	227.67 ± 5.13abcdef	27.19 ± 0.97bcdef	110.93 ± 5.85abcd
W ₂ N ₁ D ₃	61.51 ± 2.20abcd	229.67 ± 8.08abcd	26.87 ± 0.53cdefg	110.27 ± 4.59abcd
W ₃ N ₀ D ₁	60.57 ± 2.80abcd	225.67 ± 6.03bcdef	25.83 ± 1.25efg	98.80 ± 5.54e
W ₃ N ₃ D ₃	60.05 ± 2.63abcd	222.67 ± 1.53bcdef	26.08 ± 1.45defg	105.93 ± 18.77bcde
W ₃ N ₂ D ₁	62.77 ± 1.52a	210.33 ± 12.66f	27.96 ± 0.85abcd	104.40 ± 0.40cde
W ₃ N ₁ D ₂	61.35 ± 2.00abcd	222.67 ± 1.53bcdef	27.01 ± 1.94bcdef	105.20 ± 6.97cde

注:表中同列小写字母相同表示差异不显著(P<0.05);下同。

由表6可知,不同处理对制种玉米成熟期农艺性状的影响存在一定差异。从SPAD值来看,各处理间差异未达显著水平,且整体变幅较小。株高方面,W₁N₁D₁处理最高,为232.33 cm,显著高于W₃N₂D₁处理,其余处理间差异不显著。茎粗以W₁N₁D₁处理最大,达28.60 mm,显著高于W₂N₀D₁和W₃N₀D₁处理。穗位高在各处理间整体差异较小,W₂N₂D₂处理最高,为110.93 cm,W₃N₀D₁处理最低,为98.80 cm,且二者差异显著。综合来看,W₁N₁D₁处理在株高和茎粗上表现较优,W₃N₂D₁处理SPAD值最高但株高最低,说明不同处理对农艺性状的调控效应各异,适宜的水氮与密度组合有利于营养生长与光合能力的协调。

2.2 不同处理对玉米干物质积累量的影响

不同处理制种玉米关键生育期干物质积累量见表7。由表7可知,不同处理对制种玉米各生育期干物质积累量影响显著。苗期干物质积累量以W₁N₃D₂处理最

高,为6.41 g/株,显著高于W₃N₁D₂处理的4.52 g/株,其他处理间差异不显著。拔节期干物质积累量W₁N₃D₂处理最高,为107.00 g/株,显著高于W₃N₀D₁处理。抽雄期干物质积累量W₂N₁D₃处理最高,W₃N₀D₁处理最低,但各处理间差异未达显著水平。成熟期干物质积累量W₁N₁D₁处理最高,为384.00 g/株,显著高于W₁N₂D₃处理和W₁N₀D₁处理。总体上,W₁N₁D₁处理在各生育期均保持较高的干物质积累水平,而W₁N₂D₃处理成熟期积累量最低,表明适宜的水氮供应与密度组合有利于干物质的高效积累与转运。

2.3 不同处理对玉米产量及产量构成要素的影响

不同处理对制种玉米产量构成要素的影响见表8,对玉米产量指标影响见表9。

由表8可知,不同处理对制种玉米产量构成要素的影响存在差异。穗长以W₃N₁D₂处理最长,为14.49 cm,显著高于W₁N₂D₃和W₂N₀D₁处理。秃尖长以W₁N₂D₃处

表 7 不同处理下制种玉米关键生育期干物质积累量表

Tab.7 Dry matter accumulation of seed maize at key growth stages under different treatments

单位:g/株				
处理	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期
W ₁ N ₃ D ₂	6.41 ± 0.09a	107.00 ± 19.52abcd	138.33 ± 9.87abc	305.33 ± 33.50bcdefg
W ₁ N ₁ D ₁	5.80 ± 0.45abcde	104.67 ± 18.04abcd	127.67 ± 23.33abc	384.00 ± 85.51abcde
W ₁ N ₀ D ₁	5.10 ± 0.31cdef	79.67 ± 20.03cdef	125.00 ± 28.62abc	283.67 ± 16.62efg
W ₁ N ₂ D ₃	5.64 ± 0.86abcde	92.33 ± 12.01abcde	124.33 ± 10.69abc	271.33 ± 22.48fg
W ₂ N ₀ D ₁	5.12 ± 0.55cdef	73.33 ± 14.01def	132.67 ± 16.29abc	330.33 ± 23.50bcdefg
W ₂ N ₃ D ₁	5.44 ± 0.48bcdef	81.00 ± 15.39bcde	132.67 ± 6.43abc	372.33 ± 58.45abcdef
W ₂ N ₂ D ₂	5.72 ± 0.77abcde	97.33 ± 19.55abcde	138.33 ± 27.54abc	324.00 ± 38.28abcdefg
W ₂ N ₁ D ₃	6.02 ± 0.44abcde	98.33 ± 7.51abcde	146.00 ± 29.17ab	364.00 ± 25.87abcdef
W ₃ N ₀ D ₁	4.52 ± 0.05f	68.67 ± 18.50ef	118.33 ± 12.70bc	305.33 ± 21.96bcdefg
W ₃ N ₃ D ₃	5.22 ± 0.44cdef	78.00 ± 5.29cdef	130.67 ± 17.62abc	322.67 ± 73.09abcdefg
W ₃ N ₂ D ₁	4.99 ± 0.12def	87.33 ± 5.51defg	134.33 ± 18.04abc	364.33 ± 49.54abcdef
W ₃ N ₁ D ₂	5.02 ± 0.66def	96.00 ± 30.07abcde	132.33 ± 20.60abc	331.67 ± 29.03abcdefg

表 8 不同处理下制种玉米产量构成要素表

Tab.8 Yield components of seed maize under different treatments

处理	穗长/cm	秃尖长/cm	穗粗/mm	穗行数/(行·穗 ⁻¹)	行粒数/(粒·行 ⁻¹)
W ₁ N ₃ D ₂	13.32 ± 0.40bcdefg	0.70 ± 0.19bcdefg	47.07 ± 0.36a	15.33 ± 0.61ab	26.27 ± 2.11abcde
W ₁ N ₁ D ₁	13.93 ± 0.37abcd	0.80 ± 0.24abcdef	46.55 ± 1.36ab	15.20 ± 1.06abc	26.40 ± 1.91abcde
W ₁ N ₀ D ₁	13.96 ± 0.97abcd	0.87 ± 0.07abcde	45.93 ± 0.46abc	14.67 ± 0.46abcd	25.20 ± 2.66bcdef
W ₁ N ₂ D ₃	13.10 ± 0.10cdefg	1.29 ± 0.40a	44.88 ± 1.83bcd	14.80 ± 1.06abcd	23.27 ± 2.13efg
W ₂ N ₀ D ₁	12.87 ± 0.42defg	0.81 ± 0.23abcdef	45.56 ± 1.01abc	14.93 ± 1.01abcd	22.87 ± 0.83fg
W ₂ N ₃ D ₁	14.29 ± 1.17ab	0.93 ± 0.27abcd	46.05 ± 0.63abc	15.07 ± 0.61abcd	23.73 ± 4.46defg
W ₂ N ₂ D ₂	14.13 ± 0.63abc	0.81 ± 0.15abcdef	45.83 ± 1.00abc	14.53 ± 0.23abcd	24.40 ± 0.82cdefg
W ₂ N ₁ D ₃	14.41 ± 0.21a	0.73 ± 0.11bcdefg	45.52 ± 1.12abc	14.60 ± 1.00abcd	27.50 ± 0.30ab
W ₃ N ₀ D ₁	13.91 ± 0.83abcd	0.63 ± 0.34cdefg	43.37 ± 2.37d	14.40 ± 1.40bcd	25.40 ± 4.34bcdef
W ₃ N ₃ D ₃	14.17 ± 0.71abc	0.95 ± 0.37abc	45.33 ± 0.67abc	14.93 ± 0.87abcd	24.33 ± 2.54cdefg
W ₃ N ₂ D ₁	14.44 ± 1.91a	0.74 ± 0.04bcdefg	45.47 ± 1.14abc	14.40 ± 0.69bcd	25.20 ± 2.30bcdef
W ₃ N ₁ D ₂	14.49 ± 1.09a	0.72 ± 0.19bcdefg	46.08 ± 0.91abc	14.93 ± 0.23abcd	26.40 ± 1.64abcde

表 9 不同处理下制种玉米产量指标表

Tab.9 Yield indicators of seed maize under different treatments

处理	单穗质量/g	单穗籽粒质量/g	千粒质量/g	产量/[kg·(667 m ²) ⁻¹]
W ₁ N ₃ D ₂	166.33 ± 15.12bcdefg	122.67 ± 15.01bcdef	357.63 ± 25.09abcd	571.90 ± 32.37abcdef
W ₁ N ₁ D ₁	170.47 ± 25.37abcdef	131.33 ± 16.80abcd	361.43 ± 24.38abcd	572.60 ± 55.86abcdef
W ₁ N ₀ D ₁	165.80 ± 15.59bcdefg	129.33 ± 16.17abcde	350.33 ± 24.86abcd	575.99 ± 52.96abcdef
W ₁ N ₂ D ₃	131.60 ± 2.35g	99.33 ± 4.62fg	369.70 ± 5.97ab	544.08 ± 37.62cdef
W ₂ N ₀ D ₁	169.20 ± 11.86abcdef	134.67 ± 11.02abcd	349.50 ± 27.52bcd	521.03 ± 35.84ef
W ₂ N ₃ D ₁	155.93 ± 24.05cdefg	118.00 ± 24.25cdefg	350.37 ± 15.57abcd	555.89 ± 50.39bcdef
W ₂ N ₂ D ₂	159.13 ± 30.76cdefg	119.33 ± 24.01cdefg	346.30 ± 28.39cd	562.96 ± 69.19abcdef
W ₂ N ₁ D ₃	180.73 ± 34.59abcd	137.33 ± 27.06abc	353.13 ± 23.13abcd	687.95 ± 50.74a
W ₃ N ₀ D ₁	148.80 ± 46.26defg	114.00 ± 39.00defg	340.00 ± 22.20d	537.72 ± 90.51def
W ₃ N ₃ D ₃	144.40 ± 12.43efg	117.33 ± 10.50cdefg	360.80 ± 25.26abcd	604.98 ± 47.96abcde
W ₃ N ₂ D ₁	170.00 ± 2.00abcde	128.00 ± 5.29abcde	349.03 ± 19.05bcd	496.86 ± 12.55f
W ₃ N ₁ D ₂	163.80 ± 8.20bcdefg	126.00 ± 7.21abcdef	361.27 ± 27.73abc	533.14 ± 48.00ef

理最长,为1.29 cm,显著高于其他多数处理,表明该处理果穗顶部结实性较差。穗粗以 $W_1N_3D_2$ 处理最粗,为47.07 mm,显著高于 $W_3N_0D_1$ 处理。 $W_1N_3D_2$ 处理的穗行数最高,但各处理间差异不显著。行粒数以 $W_2N_1D_3$ 处理最高,为27.50粒,显著高于 $W_2N_0D_1$ 和 $W_1N_2D_3$ 处理。综合来看, $W_2N_1D_3$ 处理显示出较好的产量构成潜力。

由表9可知,不同处理对单穗质量、单穗籽粒质量、千粒质量及产量均有显著影响。单穗质量和单穗籽粒质量以 $W_2N_1D_3$ 处理最高,且显著高于 $W_1N_2D_3$ 处理。千粒质量以 $W_1N_2D_3$ 处理最高,为369.70 g, $W_3N_0D_1$ 处理最低,为340.00 g,两者差异显著。产量以 $W_2N_1D_3$ 处理最高,为687.95 kg/667 m²,显著高于 $W_3N_2D_1$ 与 $W_2N_0D_1$ 处理。总体而言, $W_2N_1D_3$ 处理在产量及部分产量构成要素(行粒数、单穗质量)上表现突出,而 $W_1N_2D_3$ 处理虽千粒质量较高,但单穗质量、单穗籽粒质量及产量均处于较低水平,说明千粒质量并非决定产量的唯一因素,穗粒数和穗质量对产量的贡献更为关键。

3 讨论

前人研究表明,合理的水氮供应可促进玉米植株形态建成,提高抗倒伏能力^[7-8]。本研究表明,不同水氮耦合与种植密度处理对制种玉米农艺性状、干物质积累和产量形成具有显著影响。在农艺性状方面, $W_1N_1D_1$ 处理在株高和茎粗上表现较优,表明适宜的水分、氮素与密度组合有利于植株营养生长的协调发育。此外, $W_3N_2D_1$ 处理的SPAD值最高,但株高最低,这可能与该处理下光合产物分配策略有关,即植株将更多光合产物分配于叶片光合机构的维持而非茎秆伸长^[9]。

干物质积累是产量形成的基础^[10]。本研究中, $W_1N_1D_1$ 处理成熟期干物质积累量最高,而 $W_1N_2D_3$ 处理最低,说明过量氮素或不当密度可能抑制干物质向籽粒转运。这一结果与已有研究结论一致,即水氮耦合通过调控光合产物分配影响最终产量^[11-12]。此外, $W_2N_1D_3$ 处理在成熟期干物质积累量虽不是最高,但产量却最高,说明该处理在干物质向籽粒的分配效率上具有优势。

产量构成要素分析显示, $W_2N_1D_3$ 处理产量最高,其行粒数和穗长等指标均处于较高水平,说明该处理在协调穗部发育方面具有优势。虽然 $W_1N_2D_3$ 处理的千粒质量较高,但穗长、穗粗和行粒数均偏低,导致单穗质量和产量下降,反映出产量形成中“源—库”关系的平衡至关重要^[13-14]。有研究表明,适当增加密度可提高单位面积穗数,但过密会加剧个体间竞争,影响穗部发育。本研究中同一密度在不同水氮组合下表现不一,进一步说明水氮耦合对密度效应的调节作用。

4 结语

本试验中, $W_2N_1D_3$ 处理(灌水量250 m³/667 m²、施氮量15 kg/667 m²、密度8 500株/667 m²)产量最高,单位面积达687.95 kg/667 m²,其行粒数和穗长等产量构成要素表现优良,干物质积累亦处于中等偏上水平,表明该处理能够较好地协调营养生长与生殖生长的关系,实现高产目标。 $W_1N_1D_1$ 处理在农艺性状和干物质积累方面表现突出,但产量略低于 $W_2N_1D_3$,表明高产不仅依赖于营养体建成,更依赖于高效的物质分配与穗部发育。因此,在制种玉米生产中,建议优先考虑 $W_2N_1D_3$ 水氮密度组合,以实现水肥资源高效利用与产量协同提升。

参考文献

- [1] 赵致禧,肖占文,程红玉,等.河西灌区玉米制种高产高效水肥一体化运筹技术模式[J].中国种业,2022(6):56-59.
- [2] 郭瑶,柴强,殷文,等.玉米密植光合生理机制及应用途径研究进展[J].作物学报,2022,48(8):1871-1883.
- [3] 郭亚宁,周建朝,王秋红,等.作物水氮耦合效应的研究进展[J].中国农学通报,2019,35(15):1-5.
- [4] 魏廷邦,柴强,王伟民,等.水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J].中国农业科学,2019,52(3):428-444.
- [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[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):161-168.
- [6] 侯云鹏,孔丽丽,尹彩侠,等.覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(1):54-65.
- [7] 边大红,刘梦星,牛海峰,等.施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2294-2304.
- [8] 毛圆圆,薛军,翟娟,等.水肥一体化条件下密植高产玉米适宜追氮次数研究[J].植物营养与肥料学报,2022,28(12):2227-2238.
- [9] 曾思洁,朱俊杰.植物非叶组织器官光合作用研究进展[J].生态学杂志,2023,42(9):2241-2249.
- [10] 刘伟,张吉旺,吕鹏,等.种植密度对高产夏玉米登海661产量及干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2011,37(7):1301-1307.
- [11] 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.
- [12] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):301-308.
- [13] 李强强,赵玥,李璠,等.作物源库关系及其生理调控途径的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(9):50-56.
- [14] 张磊,孔丽丽,侯云鹏,等.施氮水平对玉米开花后干物质积累、转运及土壤无机氮含量的影响[J].玉米科学,2020,28(4):155-164.