文章编号:1000-7601(2025)06-0184-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.18

减少灌溉量配施土壤改良剂对新疆制种玉米产量、氮素利用及硝态氮动态的影响

郝建学[1],古丽再努尔·玉山[2],林 明[2],卢亚杰[3],
赵 敏[3],谭雪莲[4],孙振才[1],樊晓琴[2]

(1.中国农业大学农学院玉米生物育种全国重点实验室,北京 100193; 2.新疆农业科学院玛纳斯农业试验站,新疆 玛纳斯 832299;
3.玛纳斯县农业农村局,新疆 玛纳斯 832200; 4.甘肃省农业科学院旱地农业研究所,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探索新疆干旱地区制种玉米的适宜灌溉制度和土壤改良措施,通过大田试验设置 3 种灌溉量(常规灌溉 W1:6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$、W2:5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$、W3:4 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$)与 4 种改良剂(N1:生物炭 2 000 $kg \cdot hm^{-2}$、N2:微生物菌肥 750 $kg \cdot hm^{-2}$、N3:生物有机肥 750 $kg \cdot hm^{-2}$、N4:有机肥 9 525 $kg \cdot hm^{-2}$)配施处理,研究减少灌溉量配施土壤改良剂对制种玉米生长特性、产量、氮素利用以及硝态氮的影响。结果表明:灌溉量 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$配施有机肥和微生物菌肥使产量大幅度提高,分别达到 6 225.3 $kg \cdot hm^{-2}$和 6 048.3 $kg \cdot hm^{-2}$,较其他处理组增产 5.2%~17.2%和 2.2%~13.9%,与常规灌溉水量相比节水 10%。5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$灌溉量配施有机肥处理成熟期干物质累积量和籽粒氮素含量最高,较其他处理分别提高 8.5%~66.7%和 4.9%~28.7%,氮素利用率和氮素收获指数较低,与 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$灌溉量配施微生物菌肥处理相比分别降低 4.2%和 1.5%。增加灌溉量加剧了硝态氮的淋溶,6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$灌溉处理 60~100 cm 土层硝态氮含量较其他处理增加 9.1%~45.5%;施用有机肥和微生物菌肥改善了土壤氮素供应状况,吐丝期 0~40 cm 土层硝态氮含量较其他处理分别提高 35.7%~59.4%和 9.4%~38.5%。综上,灌溉量 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$配施有机肥能够达到高产节水的目的,推荐将其作为新疆干旱地区制种玉米的栽培措施。

关键词:制种玉米;灌水量;土壤改良剂;氮素利用;产量

中图分类号:S513 **文献标志码**:A

Effects of reducing irrigation amount and applying soil amendments on seed maize yield, nitrogen utilization, and nitrate dynamics in Xinjiang

HAO Jianxue[1], Gulizainuer·Yushan[2], LIN Ming[2], LU Yajie[3],
ZHAO Min[3], TAN Xuelian[4], SUN Zhencai[1], FAN Xiaoqin[2]

(1. *National Key Laboratory of Maize Biotechnology, College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*;
2. *Manas Agricultural Experiment Station, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Manas, Xinjiang* 832299, *China*;
3. *Agriculture and Rural Affairs Bureau of Manas County, Manas, Xinjiang* 832200, *China*;
4. *Institute of Dryland Farming, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: To explore suitable irrigation regimes and soil amendment strategies for seed maize production in arid regions of Xinjiang, a field experiment was conducted. Three irrigation levels (conventional irrigation W1: 6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$, W2: 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$, W3: 4 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$) were combined with four soil amendments (N1: biochar (2 000 $kg \cdot hm^{-2}$), N2: microbial fertilizer (750 $kg \cdot hm^{-2}$), N3: bio-organic fertilizer (750 $kg \cdot hm^{-2}$), N4: organic fertilizer (9 525 $kg \cdot hm^{-2}$)). The effects of reduced irrigation and soil amendments on growth characteristics, yield, nitrogen utilization, and nitrate nitrogen dynamics of seed maize were investigated. The results

收稿日期:2025-01-11 **修回日期**:2025-04-14

基金项目:河北省科技计划资助项目(225A9908D);新疆维吾尔自治区玛纳斯县国家级杂交玉米种子生产基地建设玉米关键栽培技术研发项目(MNSZZDX2021-02);玉米生物育种全国重点实验室科研项目(SKLMB2442);中国农业大学“2115”人才工程项目(2024);拼多多-中国农业大学研究基金(PC2023B02006)

作者简介:郝建学(2000-),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为制种玉米高产高效。E-mail:17853829182@163.com

通信作者:孙振才(1985-),男,山东聊城人,副教授,主要从事作物优质高产技术研究。E-mail:zhencai_sun@cau.edu.cn
樊晓琴(1982-),女,新疆昌吉人,研究实习员,主要从事玉米种子质量检测研究。E-mail:448313960@qq.com

showed that the 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ irrigation level combined with organic fertilizer and microbial fertilizer significantly increased yields, reaching 6 225.3 $kg \cdot hm^{-2}$ and 6 048.3 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively. These treatments represented yield increases of 5.2%~17.2% and 2.2%~13.9% compared to other treatments and a 10% water saving compared to conventional irrigation. The 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ irrigation level with organic fertilizer application resulted in the highest dry matter accumulation and grain nitrogen content at maturity, with increases of 8.5%~66.7% and 4.9%~28.7%, respectively, compared to other treatments. However, nitrogen use efficiency and nitrogen harvest index were lower, decreasing by 4.2% and 1.5%, respectively, compared to the 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ irrigation level combined with microbial fertilizer. Increased irrigation intensified nitrate leaching, with nitrate nitrogen content at 60~100 cm soil depth under the 6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$ irrigation treatment being 9.1%~45.5% higher than other treatments. Application of both organic and microbial fertilizers improved soil nitrogen availability, increasing nitrate nitrogen content at the silking stage in the 0~40 cm soil layer by 35.7%~59.4% and 9.4%~38.5%, respectively, compared to other treatments. In conclusion, irrigating with 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ combined with organic fertilizer application is recommended as a water-saving and high-yield cultivation practice for seed maize in arid regions of Xinjiang.

Keywords: seed corn; irrigation amount; soil amendment; nitrogen utilization; yield

玉米(*Zeamays* L.)作为全球重要粮食作物之一,在我国农业经济中占据关键地位。西北地区光热资源丰富,是重要的制种玉米产区[1]。优质种子是玉米高产稳产的关键基础,关系到国家粮食安全和农民收入。有报道显示,2023 年新疆制种玉米种植面积已达 11.3 万 hm^2,占全国杂交玉米制种面积的 36.55%,超过甘肃省的 11.0 万 hm^2,成为我国第一大制种玉米基地[2]。昌吉回族自治州位于新疆维吾尔自治区天山北麓、准噶尔盆地南缘,为典型的大陆性干旱气候,具有冬季寒冷、夏季炎热、昼夜温差大的特点[3],是新疆制种玉米主要种植区,制种面积约占全疆 76.2%,实现千亩万亩连片[4]。

制种玉米与常规玉米的不同之处在于母本和父本分开种植。为防止自交,需在母本抽雄期前进行人工去雄,并通过父本授粉。制种玉米高产需要充分的水、热量等,其中水是决定产量最重要的动态因素[5],缺水限制了西北地区的农业发展。如何节约用水、制定合理的灌溉措施是农业可持续发展的核心问题。制种玉米具有较高的经济价值,因此当地农户常采用过量施肥和连续种植等措施来追求高产。然而这些做法导致了一系列负面后果,例如灌溉超量抬高了地下水位;大量使用化肥以及不合理的耕作措施导致土壤结构恶化,最终造成土壤板结,保水保肥能力下降。据统计,该地区土壤有机质含量较低(平均为 14.2 $g \cdot kg^{-1}$)[6],如果过度依赖化肥,有机肥等使用减少,会进一步加剧土壤板结,影响土壤蓄水保墒,抑制作物生长[7]。因此,制定合理的灌溉措施、进行土壤改良迫在眉睫。

传统的充分灌溉方式往往会造成水资源浪费,并且会对制种玉米的生长和产量产生负面影响[8]。张明伟等[9]通过 2 a 试验发现,60%常规灌溉量玉米均有更高的产量,相较于充分灌溉提升了 11.3%~12.1%,并且氮肥偏生产力和氮吸收效率均相对较高;唐光木等[10]研究表明玉米产量随着灌溉量的增加而增加,但当灌溉量超过 6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$时增加不显著,当地适宜的灌溉定额为 5 250~6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$。有机肥等土壤改良剂能有效提升玉米产量以及土壤肥力。王晓港[11]通过大田试验发现,添加生物炭可以明显提高旱地玉米的株高、茎粗、叶面积以及根系活力。Huang 等[12]发现生物炭可以提高玉米的光合性能,减轻氧化损伤和盐胁迫,从而提高产量与经济价值。微生物菌肥的作用机制主要包括以下两个方面:一是通过活化土壤中难溶性养分、合成多种微生物酶和有机酸来改善土壤养分可利用性;二是通过建立微生物与植物间的共生互馈关系,间接促进作物吸收养分[13]。朱望帅等[14]研究发现,减少化肥 30%配施微生物菌肥在保持玉米产量的同时,提高了土壤有机质、微生物含量以及酶活性。生物有机肥中的功能微生物较多,其中有益的微生物能与根系互利共生,促进根系发育与营养吸收,实现改土增产的效果[15]。近年来的研究表明,将有机肥料与氮肥协同使用对玉米植株的生物量积累和群体生长速率均有促进作用[16],并且在保证作物稳定增产的同时,还可以有效减少化肥的使用量,从而降低农业生产对环境的负面影响,提高氮肥利用率[17]。

目前关于节水灌溉或者土壤改良剂对普通大田玉米产量以及肥料利用率的影响已有系列报道,但其对制种玉米特别是新疆制种玉米的生长发育特征、产量、氮素利用状况以及土壤的氮素分布鲜

有报道。因此,本试验选用常规灌溉、减少10%灌溉量、减少20%灌溉量同时配施4种不同的土壤改良剂(生物炭、生物有机肥、微生物菌肥、有机肥),对新疆干旱地区制种玉米氮素吸收利用、生长发育、产量、土壤硝态氮动态等展开多方位研究,为优化该地区制种玉米产业的灌溉制度、提升土壤质量及肥料利用率提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年在新疆农业科学院玛纳斯农业试验站进行。试验站地处新疆维吾尔自治区昌吉州玛纳斯县(85°34′E,43°28′N,海拔470 m),年平均气温6.6℃,≥10℃积温3 489.7℃,年降水量90~200 mm,蒸发量1 400~2 000 mm,无霜期138~167 d,试验阶段期间降水量与日平均气温如图1所示(见192页)。根据中国土壤系统分类标准,该地区土壤类型为轻质壤土,试验地耕层土壤(0~20 cm)有机质、全氮含量分别为15.5、1.1 g·kg^{-1},速效磷、速效钾含量分别为47.6、120.3 mg·kg^{-1},硝态氮、铵态氮含量分别为28.12、8.25 mg·kg^{-1},电导率为0.53 mS·cm^{-1},总盐含量为0.91 g·kg^{-1},pH为7.04。

1.2 试验设计

采用裂区设计,设置3个灌溉水平,包括W1(6 000 m^3·hm^{-2})、W2(5 400 m^3·hm^{-2},减少10%灌水量)、W3(4 800 m^3·hm^{-2},减少20%灌水量);每个灌溉水平下设置4种不同的土壤改良剂,用量参照每种改良剂的推荐用量,包括N1(生物炭,总N 1.2%、C 43.4%,2 t·hm^{-2})、N2(微生物菌肥,总N 1.8%、C 13.3%,750 kg·hm^{-2})、N3(生物有机肥,总N 1.5%,C 27%,750 kg·hm^{-2})、N4(有机肥,总N 1.7%、C 26.1%,9 525 kg·hm^{-2}),共计12个处理,每个处理3次重复,小区面积为43.8 m^2(12.5 m×3.5 m)。采用膜下滴灌水肥一体化方式,生物炭、微生物菌肥、生物有机肥、有机肥与磷酸二铵375 kg·hm^{-2}(N∶P_2O_5∶K_2O为15∶42∶0)和硫酸钾150 kg·hm^{-2}(K_2O≥52%)全部作为基肥,播前(4月21日)一次性施入,追肥为尿素,所有处理追肥量相同,即在6月11日、6月24日、7月1日、7月18日、7月24日、8月1日、8月14日、8月22日、9月5日分别追肥7.2、7.2、7.2、11.6、11.6、23.6、23.6、17.7、12.2、12.2 kg·hm^{-2},合计134.1 kg·hm^{-2}。播种后立即对所有小区进行灌溉,提供出苗水(600 m^3·hm^{-2})确保出苗均匀。试验灌溉日期及灌溉量如表1所示。

供试品种为常用玉米品种'东单1331'双亲本,一膜双行等行距种植,先播种母本,父本分期播种,母本播种日期为2023年4月21日,父本播种日期分别为2023年4月28日和5月5日。父、母本行距均为50 cm,种植行比1∶6,即1行父本、6行母本,株距均为16.8 cm,母本理论密度97 500株·hm^{-2}、父本理论密度19 851株·hm^{-2}。吐丝期对父本喷施生长素(赤霉素0.4 ml·L^{-1},吲哚乙酸0.2 ml·L^{-1})促进父本生长使亲本花期相遇,父本在母本吐丝两周后砍除,母本在抽穗前进行人工去雄,于2023年10月4日收获。其它田间管理与当地农户保持一致。

1.3 测定方法

1.3.1 *产量及构成因素* 在母本玉米生理成熟后,选取小区的中间行进行收获,以平均穗重法选取20个玉米穗并测定穗行数、行粒数(粒)、千粒重(g)、穗粒数(粒),用国家认可并标定的粮食含水率测试仪(PM-8188,Kett,日本)测定种子水分含量,以全国谷物湿度标准的14.0%来表示玉米产量[18]。

1.3.2 *干物质与各部位的氮素含量* 在制种玉米母本的吐丝期和成熟期各小区随机选择3株玉米,分样装入到牛皮纸袋中,分成茎、叶、穗后放入105℃恒温烘箱中杀青30 min,然后在75℃恒温烘箱中烘干至恒重,称重记录,统计各处理各时期玉米的生物量;测定完毕后将各部位粉碎过0.5 mm筛,用凯氏定氮法分析各部位的氮素含量[18]。

1.3.3 *土壤硝态氮含量* 在制种玉米母本的拔节期、吐丝期和成熟期,每个小区随机选取三个点位,

表1 试验灌溉日期以及灌溉量/(m^3·hm^{-2})

Table 1 Irrigation dates and volumes for the experiment

处理 Treatment	灌溉日期 Irrigation date (m-d)										灌溉定额 Irrigation quota
	06-11	06-24	07-01	07-11	07-18	07-24	08-01	08-14	08-22	09-05	
W1	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	5400
W2	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	4800
W3	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	4200

采集 0~100 cm 土壤(间隔为 20 cm),放入-20℃冰箱冷存,待所有时期样品收集后一起解封过筛,用 2 mol · L^{-1} KCl 溶液浸提,然后用连续流动分析仪(AA3,Braun rupee,德国)测定土壤硝态氮含量[19]。

1.3.4　各指标计算　按照王鸣燕等[20]和吴晓榕[21]的方法进行计算。

氮肥偏生产力(kg · kg^{-1}) = 籽粒产量(kg · hm^{-2})/施氮量(kg · hm^{-2})

氮素吸收量(kg · hm^{-2}) = 植株氮含量(kg · hm^{-2})×植株生物量(kg · hm^{-2})/100

收获指数(%) = 籽粒产量/成熟期生物量×100%

氮素收获指数(%) = 籽粒氮素含量/植株氮素含量×100%

氮素利用率(%) = 籽粒产量/植株氮素吸收量×100%

土壤硝态氮的累积量(kg · hm^{-2}) = 土层厚度(cm)×土壤容重(g · cm^{-3})×土壤硝态氮含量(mg · kg^{-1})/10

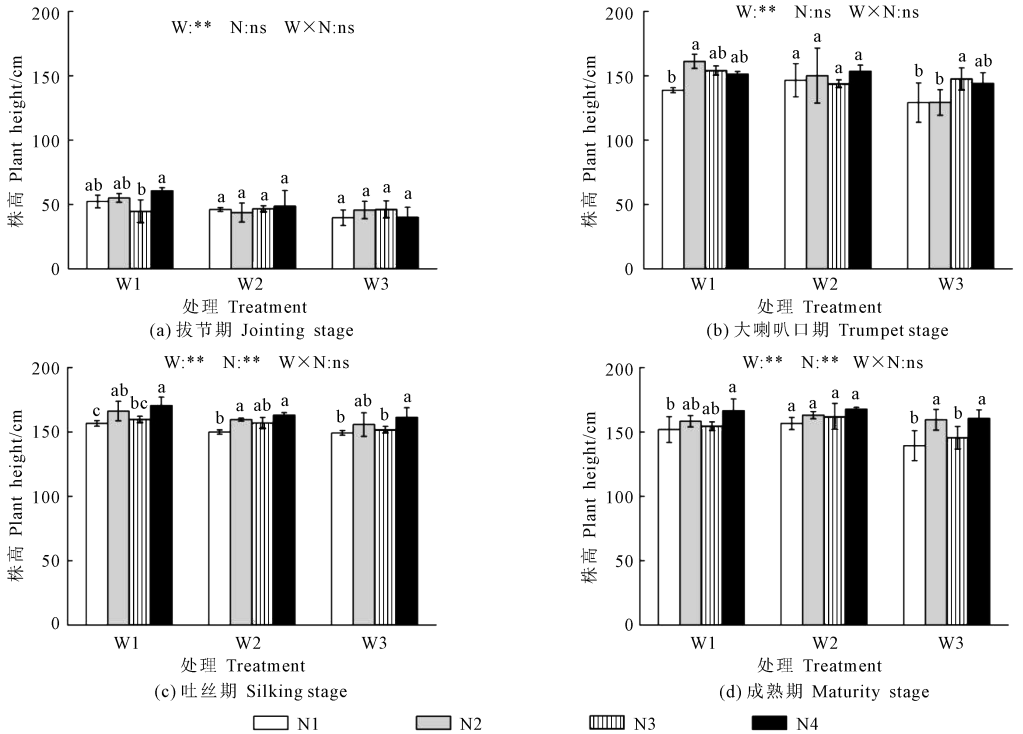
1.4　数据分析

采用 Excel 2013 进行数据整合与处理;用 SPSS 21.0 进行方差分析,多重比较采用 LSD 法(P<0.05);用 Origin2021 软件作图。

2　结果与分析

2.1　灌溉量与土壤改良剂配施对制种玉米株高的影响

制种玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期、成熟期的株高如图 2 所示。灌水量对株高的影响大致表现为 W1>W2>W3,随着灌溉量的下降,各个时期的玉米株高均显著降低,W1 处理株高比 W3 处理分别提高了 23.8%(拔节期)、10.0%(大喇叭口期)、5.7%(吐丝期)、4.4%(成熟期),随着生育进程的不断推进,灌溉量造成的株高差异逐渐减小。不同的土壤改良剂在吐丝期和成熟期对制种玉米的株高有极显著影响,具体表现为 N4>N2>N3>N1;吐丝期在同一灌溉水平下,N4 处理相较于其他土壤改良剂处理制种玉米株高分别提高了 2.6%~8.9%(W1)、2.2%~8.8%(W2)、3.6%~9.0%(W3),成熟期分别提高了 5.2%~9.7%(W1)、2.9%~7.1%(W2)、0.7%~15.3%(W3);在拔节期和大喇叭口期不同改良剂对制种玉米株高的影响不显著,四个时期改良剂与灌溉量对制种玉米株高的交互作用不明显。



注:不同小写字母代表相同灌溉量下不同改良剂类型之间差异达到显著水平(P<0.05);方差分析中 ns 代表差异不显著,* 和 * * 分别表示灌水量、土壤改良剂以及二者的交互作用达到显著(P<0.05)和极显著水平(P<0.01)。下同。

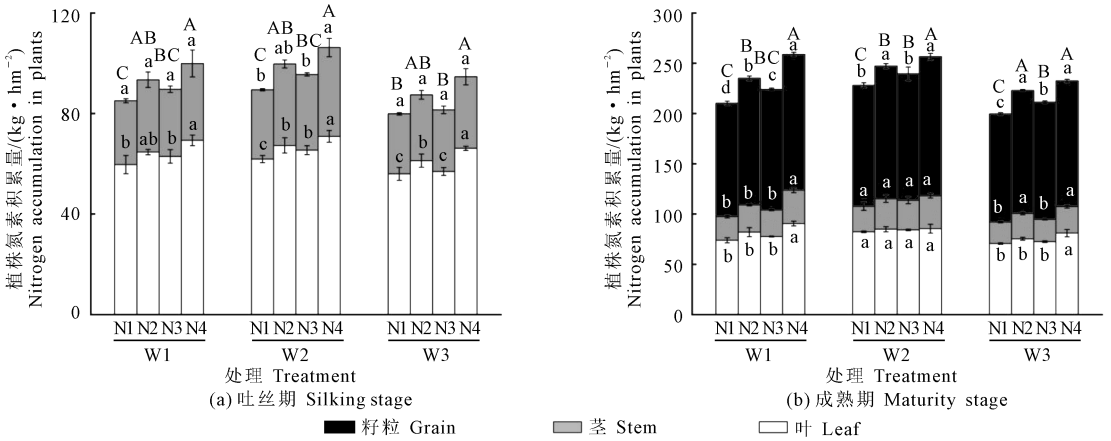
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different amendment types at the same irrigation rate (P<0.05); ns in variance analysis indicates no significant difference; * and * * indicates significant (P<0.05) and extremely significant (P<0.01) effects of irrigation rate, soil amendment, and their interaction, respectively. The same below.

图 2　各处理制种玉米不同时期的株高

Fig.2　Corn plant height at different growth stages of each treatment

2.2 灌溉量与土壤改良剂配施对制种玉米吐丝期后各器官氮素积累的影响

制种玉米吐丝期和成熟期各器官氮素积累如图 3 所示。灌溉量和土壤改良剂类型对吐丝期和成熟期的植株氮素累积均有显著影响,在相同灌溉量下,N4 处理吐丝期植株的氮素累积量显著高于 N1、N2、N3 处理,分别提高了 17.4%~19.2%、6.9%~8.2%、11.4%~16.2%,在相同的改良剂下,W2 处理下制种玉米吐丝期的氮素累积量显著高于 W1 和 W3 处理,分别提高了 5.2%~6.7%和 12.0%~16.3%。茎部氮含量在 W1 和 W3 处理下差异不显著,但在 W2 处理下,N4 处理的茎部氮含量显著高于其他处理;在相同灌溉条件下,N4 处理的叶片氮含量显著高于其他处理,相较于 N1、N2、N3 处理分别提高了 14.7%~18.2%、5.4%~8.0%、8.4%~16.2%。吐丝期至成熟期植株的茎叶氮含量所占的比重下降,籽粒的氮含量快速增加,W2 处理下的籽粒氮含量显著提高,相较于 W1 和 W3 处理提高了 4.6%~9.5%;相同灌溉量下 N4 处理的籽粒氮含量显著高于 N1 和 N3 处理,W2 条件下与 N2 差异不显著。



注:不同小写字母表示相同灌溉量下不同改良剂之间各器官氮素累积差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同灌溉量下不同改良剂之间植株地上部氮素累积差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in nitrogen accumulation in various organs between different amendments at the same irrigation amount ($P<0.05$); different uppercase letters indicate significant differences in nitrogen accumulation in the aboveground parts of plants between different amendments at the same irrigation amount ($P<0.05$).

图 3 各处理制种玉米吐丝期和成熟期各器官氮素积累量

Fig.3 Nitrogen accumulation in various organs of seed corn at silking and maturity stages of each treatment

2.3 灌溉量与土壤改良剂配施对制种玉米氮素利用的影响

灌溉量对氮肥偏生产力、氮素利用率和氮素收获指数均有极显著影响,改良剂对氮肥偏生产力的影响达到极显著水平,对氮素利用率和氮素收获指数的影响达到显著水平(表 2)。具体而言,在相同改良剂下,随着灌溉量增加,氮肥偏生产力呈现先增加后减小趋势,其中 W2 处理比 W1 和 W3 处理分别提高7.5%和 9.8%;氮素利用率与氮肥偏生产力的变化趋势相同,W2 处理比 W1 和 W3 处理分别提高14.0%和 3.7%。氮素收获指数随着灌溉量增加而显著下降,W3 处理氮素收获指数较 W1 和 W2 处理分别提高 2.6%和 1.7%。在所有灌溉条件下,N4 处理的氮肥偏生产力均为最大,与 N1、N2、N3 处理相比分别增加 7.5%~10.0%、1.6%~3.0%、3.6%~6.8%;但与其他 3 种改良剂相比,N4 处理的氮素利用率和氮素收获指数较低。灌溉量与土壤改良剂的交互效应对氮素利用率有显著影响,在高灌溉量(W1)下改良剂类型对氮素利用率的影响不显著;中低灌溉量下 N4 处理显著低于其他处理;N2 处理对水分敏感,在中灌溉量下表现最佳,在低灌溉量下明显下降。W3N2 和 W3N3 处理中玉米的氮素收获指数分别达到 54.9%和 55.2%,说明植株超过一半的氮素储存在籽粒中。

2.4 灌溉量与土壤改良剂配施对土壤硝态氮分布和累积的影响

制种玉米各生育期土壤硝态氮分布以及成熟期硝态氮的累积如图 4、5 所示。制种玉米吐丝期和成熟期土壤硝态氮含量普遍低于拔节期,这归因于玉米在快速生长发育阶段大量吸收土壤养分所致。尽管三个时期各土层的硝态氮含量存在差异,但在同一灌溉水平下垂直分布模式基本一致。在浅层土壤(0~40 cm)中,W3 处理的平均硝态氮含量比 W1 处理提高 30.7%~38.9%,而 W1 处理在深层土壤(40~100 cm)的硝态氮含量较 W2 和 W3 处理分别提高 9.1%~16.7%和 31.0%~45.5%,这种差异归

表 2　各处理制种玉米的氮素利用情况

Table 2　Nitrogen utilization of seed corn of each treatment

灌溉 Irrigation	土壤改良剂 Soil amendment	氮肥偏生产力 *PFPN* /(kg·kg^{-1})	氮素利用率 *NUE* /(kg·kg^{-1})	氮素收获指数 *NHI*/%
W1	N1	27.9±0.5b	23.5±0.4a	53.5±0.7a
	N2	29.6±0.6a	22.8±0.7a	53.4±0.8a
	N3	28.6±0.4b	22.9±0.5a	52.6±0.2a
	N4	30.5±0.7a	22.1±1.6a	53.0±1.0a
	均值 Mean	29.1±1.1B	22.8±1.1B	53.1±0.8B
W2	N1	29.8±0.6c	26.6±1.3a	53.2±1.6a
	N2	31.8±0.4b	26.0±1.2a	54.1±0.1a
	N3	31.1±0.6b	26.5±1.2a	53.8±0.2a
	N4	32.8±0.4a	25.0±0.4b	53.3±0.9a
	均值 Mean	31.4±1.4A	26.0±1.3A	53.6±1.0B
W3	N1	27.4±0.4b	26.1±0.8a	53.9±0.4b
	N2	29.0±0.7a	24.7±0.5b	54.9±0.5a
	N3	28.4±0.6a	25.6±0.9ab	55.2±0.1a
	N4	29.5±0.6a	24.1±1.0b	53.9±0.7b
	均值 Mean	28.6±1.0B	25.1±1.2AB	54.6±0.7A
方差分析 ANOVA				
W		**	**	*
N		**	*	*
W×N		ns	*	ns

注:同列不同小写字母表示在相同灌溉量下不同土壤改良剂之间差异显著(P<0.05),同列平均值后不同大写字母表示不同灌水量间差异显著(P<0.05);* 和 ** 分别表示在 P<0.05 和 P<0.01 水平下差异显著,ns 表示无显著差异。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate that the 5% significance level is reached between different soil amendments under the same irrigation amount. Different capital letters after the average value in the same column indicate that the 5% significance level is reached between different irrigation amounts. * and ** represents the significant differences at P<0.05 and P<0.01, respectively; ns represents no significant differences. The same below.

因于灌溉量增加导致的硝态氮淋溶效应,淋溶深度表现为 W1>W2>W3。拔节期相较于吐丝和成熟期有较多的硝态氮累积在土壤中,随着制种玉米生长,吐丝期土壤表层的硝态氮含量较拔节期有所降低。吐丝期和成熟期,N4 处理的 0~40 cm 土层硝态氮含量均显著提高,吐丝期较 N1、N2、N3 分别高 35.7%~59.4%、15.0%~42.8%、17.9%~26.0%;成熟期分别高 62.9%~104.7%、5.6%~61.7%、24.1%~60.1%。增加灌溉量降低了表层土壤硝态氮累积,增加了深层土壤硝态氮累积,W1 处理 0~40 cm 硝态氮累积量相较于 W2 和 W3 处理分别降低了 16.2%和29.4%。总之,灌水量和改良剂配施显著影响制种玉米生育期内硝态氮在土壤中的累积和迁移,随着灌水量的增加,硝态氮淋溶程度增加,有机肥可以使拔节期、吐丝期 0~40 cm 土层的硝态氮含量增加以满足制种玉米对氮素的需求,但是在成熟期会显著增加硝态氮的累积。

2.5　灌溉量与土壤改良剂配施对制种玉米地上部生物量及收获指数的影响

如图 6 所示,灌溉量对玉米吐丝期和成熟期的地上部生物量以及收获指数存在显著影响;不同改良剂对玉米吐丝期和成熟期的地上部生物量存在极显著影响,对玉米收获指数存在显著影响。玉米吐丝期和成熟期的地上生物量均表现为随灌溉量的增加先增加后减少,吐丝期 W1、W2 处理地上生物量显著高于 W3 处理,分别提高了 23.5%、26.3%;成熟期 W2 处理显著高于 W1、W3 处理,分别提高了 10.4%、21.4%。在相同灌溉量下,N4 处理吐丝期和成熟期的地上生物量均显著高于其他三个处理,相较于 N1、N2、N3 处理地上生物量分别提高了 27.5%~45.4%、8.5%~14.7%、13.3%~28.3%;N1 处理的收获指数显著高于 N2 和 N4 处理,分别提高了 13.1%~16.0%和 19.1%~31.8%。

2.6　灌溉量与土壤改良剂配施对制种玉米产量及相关性状的影响

不同灌溉与土壤改良剂配施对制种玉米产量及构成因素的影响如表 3 所示。灌溉量对制种玉米产量以及构成因素均有显著影响,其中对穗粒数有极显著影响。随灌溉量的增加,制种玉米的产量、行数、行粒数、穗粒数、千粒重均呈先增加后减小趋势,相较于 W1 和 W3 处理,W2 处理的产量、行数、行粒数、穗粒数、千粒重分别增加了 7.5%~9.8%、9.3%~11.9%、9.1%~20.8%、2.2%~10.5%、2.3%~3.1%,说明在 W2 灌溉处理下,制种玉米生长较优,灌溉量过大反而会影响产量;W1 与 W3 处理制种玉米的产量、千粒重无明显差异,W1 处理行数、行粒数和穗粒数显著高于 W3 处理。不同土壤改良剂对制种玉米的产量及其构成因素影响显著,对产量的影响达到极显著水平。在相同灌溉量下,N4 处理的产量优于其他土壤改良剂处理,本试验中 W2N4 处理产量最高,为 6 225.3 kg·hm^{-2},W3N1 和 W1N1 处理产量较低,分别为 5 206.93 kg·hm^{-2}和 5 310.9 kg·hm^{-2}。与 W1N1 处理相比,W2N4 产量增加 17.2%,同时节水 10%。N4 处理的行粒数和穗粒数高于 N2 和 N3 处理,分别提高2.1%~6.9%和 3.5%~12.6%;灌溉量与土壤改良剂的交互作用对行粒数和穗粒数有显著影响,中低灌溉水平下 N2 和 N4 处理的行粒数显著高于 N1 和 N3 处理,在高灌溉量下差异不明显;在高灌溉量下施用 N1、N2、N4 使得穗粒数下降,但 N3 处理仍有增效作用。综上,灌溉量 5 400 m^3·hm^{-2}配施有机肥通过增加玉米的行粒数和穗粒数提高了制种玉米的产量。

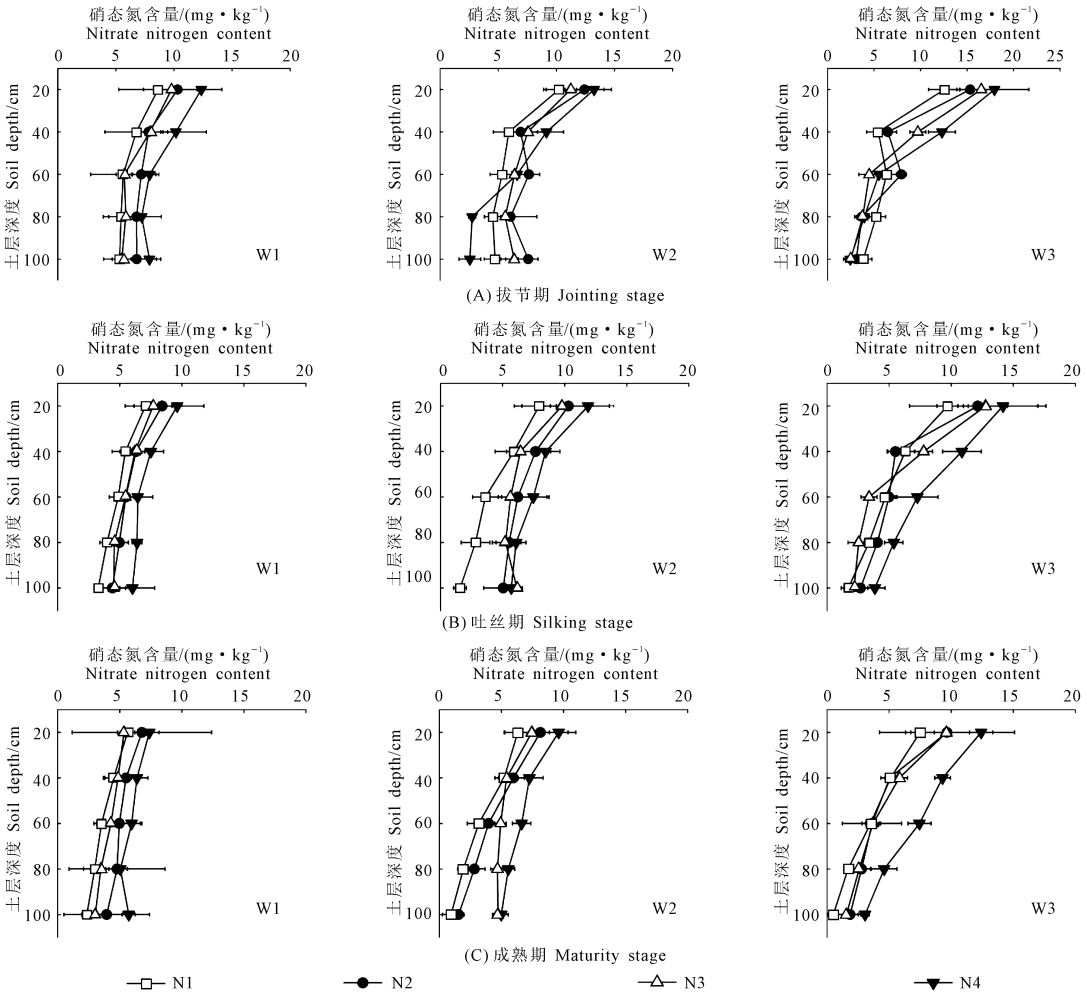
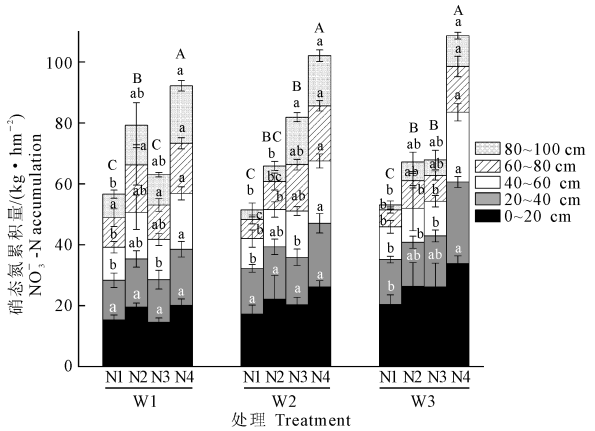


图4 各处理植株在各生育时期土壤硝态氮的分布情况

Fig.4 Soil nitrate nitrogen distribution across plant growth stages of each treatment



注:不同小写字母代表相同灌溉量下不同改良剂之间各土层硝态氮累积量差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表相同灌溉量下不同改良剂之间0~100 cm硝态氮累积量差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences in the accumulation of nitrate-nitrogen in each soil layer between different amendments at the same irrigation amount ($P<0.05$); different uppercase letters represent significant differences in the accumulation of nitrate-nitrogen in the 0~100 cm soil layer between different amendments at the same irrigation amount ($P<0.05$).

图5 成熟期不同处理在各土层的土壤硝态氮累积

Fig.5 Soil nitrate accumulation in each soil layer under different treatments at maturity stage

2.7 制种玉米产量及其构成因素与表型性状以及氮素利用变化的相关性分析

对制种玉米产量及其构成因素与氮素利用以及农艺性状进行相关性分析(图7),可知制种玉米的最终产量与其各个构成因素之间存在显著的正相关关系,说明行数、行粒数、穗粒数、千粒重对产量具有显著的正效应;制种玉米的株高与产量及其构成因素呈显著正相关关系。收获指数与产量及其构成因素、株高呈显著负相关关系;氮素收获指数与氮素利用率与其他指标之间无相关关系;氮肥偏生产力与产量及其构成因素、株高呈显著正相关关系,与收获指数呈显著负相关关系。

3 讨 论

干物质积累是产量形成的保证,而作物的氮吸收是干物质形成的基础[22]。Sarker等[23]研究表明,在1 750~4 510 $m^3 \cdot hm^{-2}$范围内,灌溉量与玉米的干物质积累呈线性关系,水分胁迫条件下玉米的干物质积累比完全灌溉减少了45%。这与本研究结果

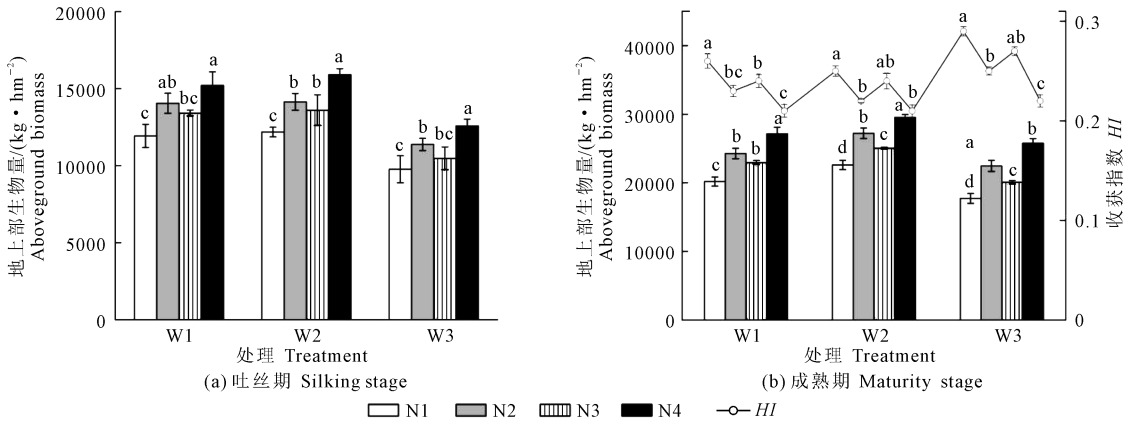


图 6　各处理玉米的地上部干物质以及收获指数

Fig.6　Corn above-ground dry matter and harvest index of each treatment

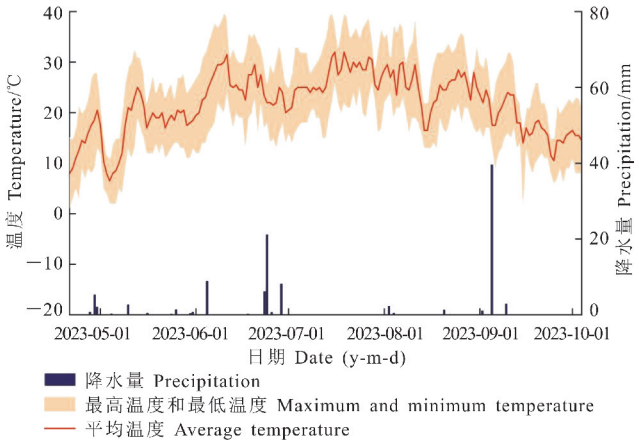
表 3　不同灌溉量和土壤改良剂对制种玉米产量及其构成因素的影响

Table 3　Effects of different irrigation and soil amendments on seed corn yield and its components

灌溉 Irrigation	土壤改良剂 Soil amendment	行数 Number of rows	行粒数 Kernels per row	穗粒数 Grain number	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Grain yield/(kg·hm⁻²)
W1	N1	13.3±0.5a	24.2±1.2a	326.3±11.5d	322.4±11.8a	5310.9±108.9b
	N2	14.7±0.8a	24.4±1.2a	367.2±8.6b	328.7±12.5a	5631.8±122.9a
	N3	14.0±0.8a	24.3±1.9a	348.7±7.1c	325.0±14.2a	5434.0±93.0b
	N4	15.3±0.9a	25.5±2.4a	372.5±7.3a	330.0±6.2a	5800.5±133.5a
	均值 Mean	14.3±1.1B	24.5±1.8AB	353.7±9.3A	326.5±8.9B	5544.3±238.1B
W2	N1	14.6±1.0b	23.7±2.7b	348.7±10.6c	328.2±13.8b	5657.2±123.5c
	N2	16.0±1.1a	28.0±0.4a	372.0±10.9b	333.9±9.8b	6048.3±89.4b
	N3	15.3±1.0a	27.2±0.6ab	327.3±8.0d	331.4±12.6b	5916.6±73.2b
	N4	16.6±0.4a	28.3±0.8a	397.3±11.1a	342.5±5.7a	6225.3±82.1a
	均值 Mean	15.7±1.2A	26.8±1.6A	361.3±13.3A	334.0±10.1A	5961.9±233.7A
W3	N1	12.6±1.0b	20.2±1.0c	310.0±9.1b	320.6±7.6a	5206.9±89.0b
	N2	14.3±0.9a	23.6±1.0a	338.6±8.6a	325.5±7.0a	5509.4±138.6a
	N3	14.0±0.4a	21.1±0.7b	314.4±10.7b	323.6±4.3a	5401.7±118.1a
	N4	15.1±1.0a	23.8±1.4a	345.3±15.6a	326.5±10.0a	5598.5±123.0a
	均值 Mean	14.0±1.3B	22.2±1.9B	327.1±10.1B	324.1±6.2B	5429.1±206.4B
方差分析 ANOVA						
W		*	*	**	*	*
N		*	*	*	*	**
W×N		ns	*	*	ns	ns

类似,W2 较 W3 处理提高了制种玉米在不同生育时期的地上部干物质和氮素累积,这与水分胁迫导致玉米根系发育不良、净光合速率减弱,最终影响玉米的干物质积累和氮素吸收有关[24]。前人研究表明,以当地常规灌溉(12 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$)为基准,减少 10%和 20%的灌溉量并未显著影响制种玉米的产量和干物质积累[25];本研究发现,与 W1 处理相比,W2 处理成熟期地上部生物量、穗部氮素含量以及产量均显著提高,一方面是因为适度干旱促进了玉米根系下扎,使其高效利用水分,这样既不会造成水分不足又能保证制种玉米的正常生长[26];另一方面可能是由于玉米生育后期(9 月)降水相对较多,结合常规灌溉会使叶绿素积累受限,导致玉米早衰,氮素转运速率下降[27]。

本研究表明,与其他 3 种改良剂相比,施用有机肥显著增加了制种玉米的产量、干物质及氮素累积,这种积极的影响可能是因为施用有机肥提高了土壤肥力并改善了物理性质[28]。土壤有机碳(SOC)是衡量土壤肥力水平的重要指标,提高 SOC 含量可以改善土壤的物理结构和持水性能,增强养分供应能力,从而促进作物的高产稳产[29]。Zuo 等[30]研究表明,SOC 累积量与外源有机物料有机碳含量和施用量呈显著正相关关系,在本试验条件下,施用有机肥与其他 3 种有机改良剂相比更有利于 SOC 积累,主要由于有机肥中较高的碳含量(26.1%)和施用量。生物炭虽然碳含量高,由于其特殊的化学结构使其有机碳的稳定性更高,研究表明在相同施用量下生物炭在连续施用 15 d 后 SOC 水平与有机肥处理的水平接近[31]。有机肥的投入为微生物提供了充足的碳源和能量,刺激其活动,有效改善了土壤结构,促进有机氮向铵态氮和硝态氮转化[32],为作物根系生长提供了良好的环境条

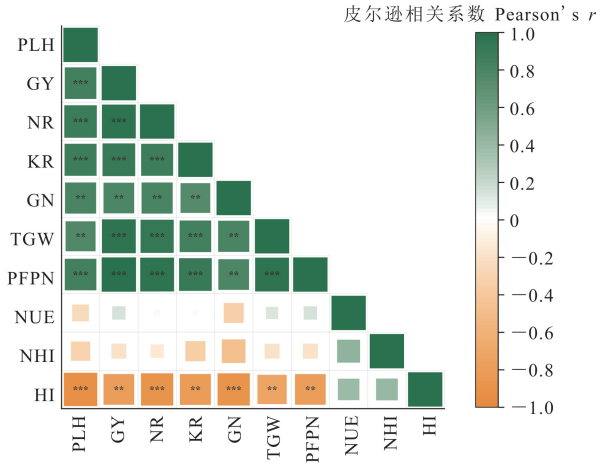


注:生育期降水量总计 107.01 mm。

Note: Total precipitation during the growing period 107.01 mm.

图 1 制种玉米生育期内的降水量与日平均气温

Fig. 1 Precipitation and daily average temperature during the growth period of seed corn



注:PLH:株高;GY:产量;NR:行数;KR:行粒数;GN:穗粒数;TGW:千粒重;PFPN:氮肥偏生产力;NUE:氮素利用率;NHI:氮素收获指数;HI:收获指数。* * 和 * * * 分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平显著相关。

Note: PLH: Plant height; GY: Yield; NR: Number of rows; KR: Number of grains per row; GN: Number of grains per ear; TGW: 1000 - grain weight; PFPN: Partial nitrogen productivity; NUE: Nitrogen utilization efficiency; NHI: Nitrogen harvest index; HI: Harvest index. * * and * * * indicates the significant differences at $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively.

图 7 玉米产量及构成因素与表型性状以及氮素利用变化的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between corn yield and its components, phenotypic traits, and nitrogen utilization changes

件。因此,有机肥可以成为提高该地区制种玉米产量的重要选择。在本研究中,各改良剂的施用量参照的是每种改良剂的推荐用量,具体的最佳施用量及长期的影响还有待后续研究确定。

灌溉和氮肥是影响土壤硝态氮分布和淋失的主要因素[33]。本研究表明,所有处理中土壤硝态氮含量峰值均在耕层,这可能与膜下滴灌的灌溉方式以及制种玉米生育期降水较少有关[34]。随着灌溉量增加,土壤硝态氮逐渐向更深土层累积,因为水进入农田后,部分水分会向更深土层运移,导致土壤硝态氮随之向下迁移,增加硝态氮淋失量[35];另外在水分胁迫条件下,土壤硝态氮残留量会升高,原因是在相同氮肥施用量下,水分胁迫导致玉米过早衰老,显著影响根系吸收功能,从而使硝态氮滞留于土壤中未被玉米有效利用[36]。研究表明,玉米的根系主要分布在 0~40 cm 土层,占整体根系的 80%以上[37],所以 40 cm 土层以下的土壤硝态氮很难被玉米吸收利用。有机肥提高了拔节期和吐丝期 0~40 cm 土层的硝态氮含量,说明施用有机肥提高了土壤氮素供应能力,促进玉米根系的生长与养分吸收,进而提升了玉米产量[38],然而有机肥的过量使用会导致成熟期土壤硝态氮累积,增加了氮素污染风险[39]。施用微生物菌肥籽粒产量虽然略低于有机肥,但是与其相比成熟期硝态氮累积量显著减少,降低了氮素污染的风险,提高了氮素利用率,这可能是因为微生物可以固定一部分化学形态的氮,将其同化为有机形态,当作物需要时会分解和释放固定的氮素供作物吸收利用[40]。

4 结 论

在相同土壤改良剂处理下,5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 灌溉处理促进了制种玉米的生长发育,提高了吐丝期和成熟期制种玉米干物质以及植株氮素含量,提高了吐丝期 0~40 cm 土层的硝态氮含量,从而使其产量显著高于其他灌溉处理。相同灌溉量下,与其他土壤改良剂相比,施用有机肥提高了吐丝期和成熟期玉米干物质累积和植株氮含量,提高了关键生育期 0~40 cm 土层的硝态氮供应,有利于被玉米吸收利用,从而提高了制种玉米产量和氮肥偏生产力。灌溉量 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 配施有机肥处理与其他处理相比,制种玉米的干物质累积、氮素吸收量和籽粒产量最高。因此,灌溉量 5 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 配施有机肥可作为新疆干旱地区制种玉米高产节水的栽培措施。

参 考 文 献:

[1] 张建斌, 徐平德, 张大亮, 等. 河西绿洲灌区膜下滴灌制种玉米水钾耦合效应分析[J]. 玉米科学, 2024, 32(5): 88-95.
ZHANG J B, XU P D, ZHANG D L, et al. Analysis of water-potassium coupling effect of drip irrigation under mulch on seed-maize in Hexi oasis[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(5): 88-95.

[2] 中华人民共和国农业农村部. 2024 中国农业农村统计摘要[EB/

OL]. [2024-09-08]. https://zdscxx.moa.gov.cn:9443/misportal/public/publicationRedStyle.jsp.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. 2024 summary of agricultural and rural statistics in China[EB/OL]. [2024-09-08]. https://zdscxx.moa.gov.cn:9443/misportal/public/publicationRedStyle.jsp.

[3] 叶尔克江·霍依哈孜, 阿帕尔·肉孜. 昌吉市制种玉米生长季气候条件与产量和生育期的关系[J]. 农业灾害研究, 2019, 9(5): 47-50, 64.
KHOIKAZ Y, ROZI A. Relationship between climate conditions and yield and growth period of seed-producing maize in Changji City[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2019, 9(5): 47-50, 64.

[4] 徐丽. 昌吉州玉米种业发展调研报告[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
XU L. Research report on the development of corn seed industry in Changji Prefecture[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.

[5] CHAI Y W, CHAI Q, LI R, et al. Straw strip mulching in a semiarid rainfed agroecosystem achieves winter wheat yields similar to those of full plastic mulching by optimizing the soil hydrothermal regime[J]. The Crop Journal, 2022, 10(3): 879-892.

[6] 杜娟. 昌吉市土壤有机质提升途径及成效[J]. 农村科技, 2018, (12): 32-33.
DU J. Ways and effects of improving soil organic matter in Changji City[J]. Rural Science & Technology, 2018, (12): 32-33.

[7] 朱生堡, 乌尔古丽·托尔逊, 唐光木, 等. 新疆盐碱地变化及其治理措施研究进展[J]. 山东农业科学, 2023, 55(3): 158-165.
ZHU S B, TORSUN U, TANG G M, et al. Research progress on saline-alkali land changes and its treatment measures in Xinjiang[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(3): 158-165.

[8] 王飞, 王浩宇, 蔺宝军, 等. 水氮调控对河西干旱区制种玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 298-307.
WANG F, WANG H Y, LIN B J, et al. Effects of water and nitrogen regulation on yield and water use efficiency of maize cultivated in the arid region of Hexi[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2024, 42(3): 298-307.

[9] 张明伟, 杨恒山, 范秀艳, 等. 浅埋滴灌下水氮减量对春玉米干物质积累及水氮利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 149-156.
ZHANG M W, YANG H S, FAN X Y, et al. Effect of reduction of nitrogen and irrigation on dry matter accumulation and utilization efficiency of water and nitrogen of spring maize in shallow drip irrigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 149-156.

[10] 唐光木, 何红, 杨金钰, 等. 灌溉定额对膜下滴灌玉米生理性状及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 293-297.
TANG G M, HE H, YANG J Y, et al. Effect of irrigation quota on physiological characteristic and yield in drip irrigation under mulch of maize[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 293-297.

[11] 王晓港. 生物质炭基肥对旱区土壤性状及玉米生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
WANG X G. Effects of biochar-based fertilizer on soil properties and corn growth in arid areas[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.

[12] HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHU C L, et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 405-413.

[13] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.

[14] 朱望帅, 韩震, 胡一涵, 等. 化肥减施配施微生物菌肥对盐碱地土壤质量及玉米产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(12): 91-96.
ZHU W S, HAN Z, HU Y H, et al. Effects of fertilizer reduction combined with microbial fertilizer on soil quality and maize yield and quality in saline-alkali land[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(12): 91-96.

[15] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004, (5): 12-16.
WANG L G, LI W J, QIU J J, et al. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. Soils and Fertilizers, 2004, (5): 12-16.

[16] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 564-573.
YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and in corporation of straw on nitrate leaching in farmland under wheat-maize rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 564-573.

[17] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 812-820.
FU W, LIU K P, CHEN H S, et al. Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 812-820.

[18] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, et al. Coupling effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer type on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-irrigated maize[J]. Agricultural Water Management, 2022, 261: 107389.

[19] 朱继荣, 祝鹏飞, 束良佐. 连续流动分析法测定土壤硝态氮实验综述报告[J]. 科技视界, 2019, (13): 77-78.
ZHU J R, ZHU P F, SHU L Z. Overview of a comprehensive experiment of determining soil nitrate nitrogen by continuous flow analysis[J]. Science & Technology Vision, 2019, (13): 77-78.

[20] 王鸣燕, 宿顺顺, 冯浩, 等. 节水灌溉与有机肥配施对关中地区夏玉米氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 165-172.
WANG M Y, SU S S, FENG H, et al. Effects of water-saving irrigation and combined application of organic fertilizer on nitrogen utilization of summer maize in Guanzhong area[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(4): 165-172.

[21] 吴晓榕. 增密减肥对垄沟集雨种植春玉米产量与水氮利用的调控效应及其机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
WU X R. Study on the regulatory effect and mechanism of increasing density and reducing weight on yield and water and nitrogen

utilization of spring maize planted with ridge and furrow rainwater collection[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

[22] QI D L, HU T T, LIU T T. Biomass accumulation and distribution, yield formation and water use efficiency responses of maize (*Zea mays* L.) to nitrogen supply methods under partial root-zone irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105981.

[23] SARKER K K, HOSSAIN A, TIMSINA J, et al. Alternate furrow irrigation can maintain grain yield and nutrient content, and increase crop water productivity in dry season maize in sub-tropical climate of South Asia[J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 106229.

[24] 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.
WEI T B, CHAI Q, WANG W M, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428-444.

[25] 苏永中, 张智慧, 杨荣. 黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米水氮用量配合试验[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 2007-2015.
SU Y Z, ZHANG Z H, YANG R. Amount of irrigation and nitrogen application for maize grown on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe river basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(12): 2007-2015.

[26] WANG F, XIAO J F, MING B, et al. Grain yields and evapotranspiration dynamics of drip-irrigated maize under high plant density across arid to semi-humid climates[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247: 106726.

[27] 王卫杰, 张彦群, 祁鸣笛, 等. 滴灌灌水量对玉米耗水及生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(10): 1063-1068.
WANG W J, ZHANG Y Q, QI M D, et al. Effects of drip irrigation amount on water consumption and growth of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(10): 1063-1068.

[28] 张体硕. 施氮与有机物料还田对黄土高原冬小麦农田培肥增效的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
ZHANG T S. Effects of nitrogen application and organic matter return on fertilization and efficiency of winter wheat fields on the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[29] TIESSEN H, CUEVAS E, CHACON P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. Nature, 1994, 371(6500): 783-785.

[30] ZUO W G, XU L, QIU M H, et al. Effects of different exogenous organic materials on improving soil fertility in coastal saline-alkali soil[J]. Agronomy, 2022, 13(1): 61.

[31] LI X, LI J, ZHAO Z H, et al. Soil organic carbon and humus characteristics: response and evolution to long-term direct/carbonized straw return to field[J]. Agronomy, 2024, 14(10): 2400.

[32] WANG Y, LI Q X, LI C Y. Organic fertilizer has a greater effect on soil microbial community structure and carbon and nitrogen mineralization than planting pattern in rainfed farmland of the lofess plateau[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1232527.

[33] WANG Y, MENG Z, MENG H, et al. Regulation of nitrogen balance and yield on greenhouse eggplant under biochar addition in Mollisol[J]. Plant Soil and Environment, 2022, 68(1): 36-48.

[34] 翟勇全, 马琨, 贾彪, 等. 不同降水年型滴灌玉米土壤硝态氮分布、淋失量及氮素吸收利用特征[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(5): 765-775.
ZHAI Y Q, MA K, JIA B, et al. Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize under drip irrigation in different precipitation years[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2023, 31(5): 765-775.

[35] CAMBOURIS A N, ZEBARTH B J, NOLIN M C, et al. Apparent fertilizer nitrogen recovery and residual soil nitrate under continuous potato cropping: effect of N fertilization rate and timing[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(5): 813-825.

[36] LIU Q F, CHEN Y, LIU Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the loess plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 1-10.

[37] 楚光红, 章建新, 高阳, 等. 施氮量对滴灌超高产春玉米根系时空分布及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 156-160.
CHU G H, ZHANG J X, GAO Y, et al. Effects of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution characteristics of super-high yield spring maize root and yield under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 156-160.

[38] 费聪, 张开祥, 马宏秀, 等. 有机肥配施氮肥对玉米根系生长、氮素利用及产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 26-34.
FEI C, ZHANG K X, MA H X, et al. Effects of organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer on root growth, nitrogen use, yield and quality of maize[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(5): 26-34.

[39] 张凯璐, 申丽霞, 孟涵, 等. 微润灌有机肥配施对土壤硝态氮和番茄生长的影响[J]. 北方园艺, 2023, (15): 10-16.
ZHANG K L, SHEN L X, MENG H, et al. Effects of applying organic fertilizer on soil nitrate nitrogen and the growth of tomato under moistube-irrigation[J]. Northern Horticulture, 2023, (15): 10-16.

[40] 王秀娟, 韩瑛祚, 何志刚, 等. 微生物菌肥对设施番茄养分吸收与土壤氮磷累积的影响[J]. 北方园艺, 2021, (19): 100-106.
WANG X J, HAN Y Z, HE Z G, et al. Effects of microbial fertilizer on nutrient uptake of tomato and soil nitrogen and phosphorus accumulation in facilities[J]. Northern Horticulture, 2021, (19): 100-106.