

尿素硝铵溶液对西辽河平原密植滴灌水肥一体化春玉米产量和氮肥生产效率的影响

富家乐^{1,2}, 沈东萍², 方 梁², 周林立², 杨宏业², 张国强², 王克如²,
明 博², 于静辉³, 孙 磊³, 矫丽娜³, 李少昆^{1,2}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室/作物基因资源与育种
全国重点实验室, 北京 100081; 3. 通辽市农业技术推广中心, 内蒙古 通辽 028000)

摘 要: 为实现西辽河平原玉米高产稳产和养分的高效利用, 研究尿素硝铵溶液(UAN)对滴灌水肥一体化密植(9.0×10^4 株/hm²)玉米群体产量、氮肥利用效率和经济效益的影响。2020–2023年在西辽河平原补充灌溉区开展研究, 试验在黏壤土和沙土进行, 设置常规尿素追肥(CK)、UAN追肥 350 kg/hm²(F3)、250 kg/hm²(F2)、150 kg/hm²(F1)以及不施氮肥(F0)5个处理。结果表明, 分次追施UAN 250 kg/hm², 产量达 14.09 ~ 17.92 t/hm², 氮肥农学利用率达 37.06 ~ 45.67 kg/kg, 平均净收益达 15 295.5 元/hm²。相比CK处理, 玉米的产量、氮肥农学利用率和经济效益平均分别提高 5.30% ~ 9.88%、107.31% ~ 131.23%和 16.31% ~ 38.86%。结果表明, 分次追施UAN 223.72 ~ 268.74 kg/hm²可在西辽河平原区域获得较高的产量, 同时显著减少氮肥投入, 提高氮肥利用率和经济效益。

关键词: 玉米; 密植高产; 水肥一体化; UAN; 氮肥利用率

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effect of Urea Ammonium Nitrate on Yield and Nitrogen Fertilizer Efficiency of Spring Maize with Dense Drip Irrigation and Water–Fertilizer Integration in the West Liaohe Plain

FU Jia-le^{1,2}, SHEN Dong-ping², FANG Liang², ZHOU Lin-li², YANG Hong-ye², ZHANG Guo-qiang²,
WANG Ke-ru², MING Bo², YU Jing-hui³, SUN Lei³, JIAO Li-na³, LI Shao-kun^{1,2}

(1. Agronomy College, Ningxia University, Yinchuan 750021;

2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture/State Key Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding, Beijing 100081;

3. Tongliao Agro-technical Extension Center, Tongliao 028000, China)

Abstract: A study was conducted to investigate the effects of urea ammonium nitrate solution(UAN) on maize yield, nitrogen use efficiency, and economic benefits with integrated drip irrigation(9.0×10^4 plants/ha) in the West Liaohe Plain from 2020 to 2023. The experiment was carried out in clay loam and sandy soil with five treatments by conventional urea topdressing(CK), UAN topdressing at 350 kg/ha(F3), 250 kg/ha(F2), 150 kg/ha(F1), and no nitrogen fertilizer(F0). The results showed that F2 treatment, the yield ranged from 14.09 to 17.92 t/ha, the nitrogen fertilizer utilization rate was 37.06–45.67 kg/kg, and the average net benefit was 15 295.5 yuan/ha. Compared with CK, maize yield, nitrogen fertilizer utilization rate, and economic benefits increased by 5.30%–9.88%, 107.31%–131.23%, and 16.31%–38.86%, respectively. It was concluded that applying UAN at 223.72–268.74 kg/ha can achieve higher yield, reduce nitrogen input, improve nitrogen utilization and economic benefits.

Key words: Maize; High density planting; Integration of water and fertilizer; UAN; Nitrogen use efficiency

录用日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金专项项目(M2142005、M2242004)、中国农业科学院基本科研业务费专项项目(S2023QH22)、通辽市科技计划项目(TL2023YF006)

作者简介: 富家乐(1997–),男(满族),内蒙古通辽人,硕士,主要研究方向为玉米高产高效栽培理论与技术。E-mail: fujiale2024 @163.com
李少昆和张国强为本文通信作者。Tel: 010-82108891 E-mail: lishaokun@caas.cn

玉米作为我国的第一大粮食作物,同时又作为饲料、化工及酿造等行业的重要原料,玉米的高产稳产对保障我国粮食安全具有重要意义^[1-2]。玉米产量是通过群体生产而实现的,合理密植可以在一定范围内提高作物冠层光截获、冠层生产力和生物量,是提高玉米子粒产量最直接有效的途径^[3-4]。不同区域玉米获得最高产量对应的适宜种植密度是由当地光照资源决定的^[5]。有研究表明,在西辽河平原采用耐密型玉米品种在 9.0×10^4 株/hm²种植密度条件下获得较高的子粒产量和容重^[6]。

氮是促进作物生长的重要元素,合理施用氮肥对保障作物生长发育、实现作物优质高产起着重要的作用^[7-9]。前人研究表明,氮肥可以显著提高玉米产量,当施氮量达到一定程度后,玉米产量不再显著增加^[10]。生产中农户往往为追求高的作物产量而施用过量的氮肥,造成增产不增收,浪费大量的氮肥,降低氮肥的利用效率,并带来一系列的环境污染问题^[11-12]。此外,当前生产中普遍施用的肥料以固体颗粒型为主,其存在挥发性大、养分释放慢和溶解性差等问题。在水肥一体化快速发展的态势下,生产中亟需水溶性好、吸收利用效率高、环保安全的新型高效肥料。

近年来出现的液态肥料推进了水肥一体化技术的发展与推广。尿素硝铵溶液(UAN)是一种新型液体氮肥,将硝态氮、铵态氮、酰胺态氮3种氮源集中在一起,产品中性,具备腐蚀性低、复配性好、水溶性强和利用效率高等优点,尤其在滴灌水肥一体化农业生产中具有良好的应用前景^[13-15]。研究表明,在相同施氮量、施用方式条件下,UAN相比常规尿素显著提高玉米的产量,并且施用液态肥可以节水40%,肥料利用率提高20%,土壤病害可以减少30%,并减少农药的使用量^[16-18]。

通辽地处西辽河平原腹地,为内蒙古自治区玉米主产区,常年玉米种植面积稳定在120万hm²,是我国优质的商品粮生产基地。近年来浅埋滴灌水肥一体化技术已经大面积应用于玉米生产。过量施氮已成为玉米生产中普遍存在的问题,导致氮肥生产效率低。UAN的使用目前处于初步试验阶段,生产上缺乏UAN使用的施肥制度,相关应用研究相对较少。因此,在不同土壤质地开展多年大田试验,研究西辽河平原浅埋滴灌水肥一体化条件下,不同UAN追肥施用量对玉米产量、氮肥利用率和经济效益的影响,明确西辽河平原春玉米水肥一体化追施UAN的最佳施肥制度,可以为当地玉米的高产高效栽培提供理论基础与技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2020–2023年在内蒙古通辽市科尔沁区钱家店镇和经济技术开发区辽河镇开展。钱家店镇试验点(43°43' N, 122°26' E;海拔171 m),年日照时数2 500~2 800 h,2020–2023年玉米生长期(5–10月)平均温度分别为21.39、20.70、20.26和20.40℃,降雨量分别为359.1、326.4、362.6和357.8 mm,试验田土质为粉砂质黏壤土。2020–2023年0~60 cm土壤平均有机质含量23.88 g/kg,全氮含量1.40 g/kg,碱解氮87.5 mg/kg,速效钾296.0 mg/kg,速效磷16.34 mg/kg,pH值7.5。辽河镇试验点(43°37' N, 122°19' E,海拔182 m),年日照时数1 429~1 813 h,2021–2023年玉米生长期(5–10月)平均温度分别为21.11、21.16和22.46℃,降雨量分别为292.3、339.4和350.6 mm,试验田土质为砂土。2021–2023年0~60 cm土壤平均有机质含量11.6 g/kg,全氮含量0.90 g/kg,碱解氮50.2 mg/kg,速效钾81.4 mg/kg,速效磷5.7 mg/kg,pH值8.4。两个试点田块前茬均为玉米。

1.2 试验设计

试验以迪卡159为供试品种,种植密度为9.0万株/hm²,采用宽窄行(80 cm+40 cm)种植,以追施尿素500 kg/hm²(CK)为对照,设置3个尿素硝铵溶液(UAN)追肥水平,UAN追肥350 kg/hm²(F3)、UAN追肥250 kg/hm²(F2)、UAN追肥150 kg/hm²(F1)和不施氮肥(F0),种肥统一施入尿素(N 46%)77.73 kg/hm²(F0除外)、磷酸二铵(P₂O₅ 64%;N18%)180.50 kg/hm²、氯化钾(K₂O 60%)200.00 kg/hm²,F0处理底肥施过磷酸钙(含P₂O₅ 45%)256.67 kg/hm²。小区面积72 m²(长10 m,宽7.2 m),3次重复。试验所有处理在播种后24 h内浇出苗水,滴水齐苗,提高玉米的出苗率和整齐度。玉米整个生育期分次追肥,从7展叶期开始每隔8~10 d追施1次,追肥总计6次。供试液体肥料选用优斯美UAN尿素硝铵溶液,总含氮量32%,总氮(N)422 g/L,其中硝态氮(NO₃⁻)102 g/L、铵态氮(NH₄⁺)102 g/L、酰胺态氮218 g/L。常规颗粒尿素,氮含量为46%。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量测定与考种

在玉米进入生理成熟期后,各处理去除边行及两端2 m,消除边行效应。在每个小区中间选取6行宽,5 m长,进行田间测产,收获小区全部玉米果穗,称取玉米果穗鲜重。统计果穗数量,按平均穗重法选取20个果穗作为标准样穗,脱粒称重,计算出籽

率,用谷物水分测定仪(PM-8188)测定子粒的含水率。按国家粮食水分标准 14.0%计算出实际的产量。玉米收获穗数、穗粒数和千粒重,通过田间调查和室内考种完成。

1.3.2 氮肥生产效率

氮肥的生产效率按照如下公式进行计算:
氮肥偏生产力(PFP_N)=施氮区子粒产量/施氮量;
氮肥农学利用率(AE_N)=(施氮区子粒产量-不施氮区子粒产量)/施氮量。

1.3.3 经济效益

经济效益=子粒产量×玉米价格-施肥量×肥料价格-其他成本。其他成本包括整地、种子、除草、收获、水电、管带、人工及地租等费用。钱家店镇试验田 2020–2023 年地租费分别为 10 500、15 000、18 000 和 18 000 元/hm²,辽河镇试验田 2021–2023 年地租费分别为 12 000、16 200 和 18 000 元/hm²;UAN 按平均价格 4.3 元/kg 计算;P₂O₅ 2.3 元/kg, K₂O 6.2 元/kg; 2020–2023 年尿素的价格分别为 2.8、2.8、3.0 和 3.2 元/kg。玉米价格以当地实际收购价格计算, 2020–2023 年标准水分收购价格分别为 2 040、2 400、2 300 和 2 450 元/t。

1.3.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行整理,使用 SPSS 26.0 对数据进行方差分析,采用 LSD(*P*< 0.05)检验法进行多重比较及差异显著性分析,采用 Origin 2022 进行作图。

2 结果与分析

2.1 追施UAN对玉米产量及产量构成的影响

两地多年试验结果表明,追施UAN对玉米子粒

产量有显著影响(表 1)。F2 和 F3 处理玉米产量差异不显著,显著高于 CK 处理。在钱家店镇试点, 2020–2023 年 F2 处理的玉米产量较 CK 处理分别高 5.16%、5.28%、5.30% 和 5.46%; 在辽河镇试点, 2021–2023 年 F2 处理的玉米产量较 CK 处理分别高 8.80%、9.59% 和 11.24%。UAN 对玉米产量的影响在不同土质下存在差异,沙土地块(辽河)的玉米增产效果更显著。

不同施肥处理对玉米的收获穗数无显著影响,施肥处理主要通过影响玉米穗粒数和千粒重而影响产量。F2 与 F3 处理的千粒重和穗粒数差异不显著,但显著高于 CK、F1 和 F0 处理。在钱家店镇试点, 2020–2023 年 F2 处理的穗粒数较 CK 处理分别高 6.02%、6.51%、6.88% 和 6.39%, 千粒重分别高 7.50%、5.05%、6.95% 和 5.90%。在辽河镇试点, 2021–2023 年 F2 处理的穗粒数较 CK 处理分别高 6.58%、6.25% 和 7.73%, 千粒重分别高 5.89%、7.39% 和 6.40%。由此说明,与追施普通尿素相比,追施 UAN 能够通过影响玉米的穗粒数和千粒重进而提高玉米产量。

通过对不同 UAN 施用量与玉米产量之间的关系进行拟合(图 1)。结果表明,随着 UAN 施用量增加,玉米群体产量呈现“线性+平台”的变化趋势。在钱家店镇试点, UAN 施用量在 223.72 ~ 235.82 kg/hm² 时,玉米群体获得了 16.65 ~ 17.93 t/hm² 的产量; 在辽河镇试点, UAN 施用量在 262.57 ~ 268.74 kg/hm² 时,玉米群体获得了 14.28 ~ 15.53 t/hm² 的产量。

由表 1 结果可知,地点、年份、氮肥处理、地点×年份和地点×氮肥处理显著影响玉米产量(*P*< 0.01); 地点、年份、氮肥处理、地点×年份、地点×氮肥处理、

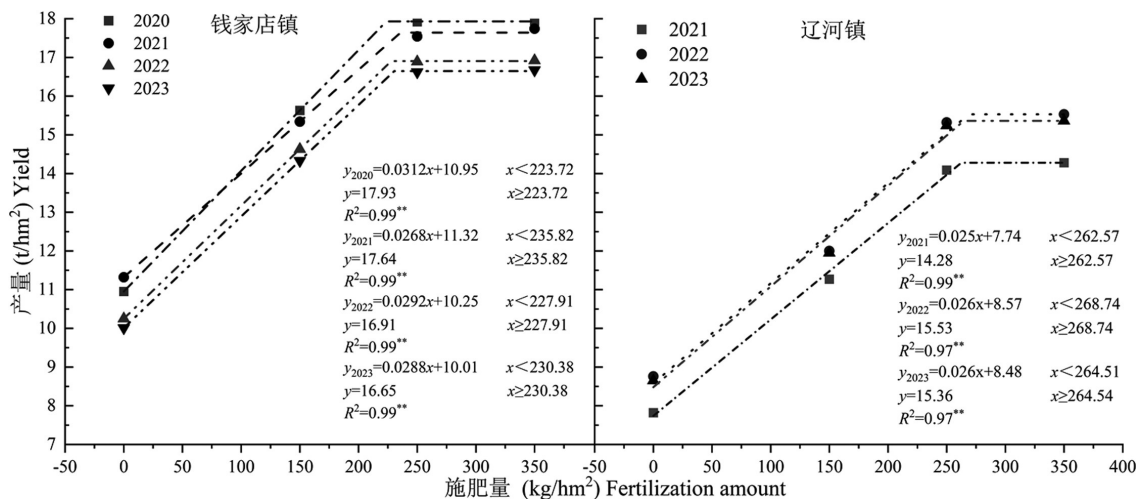


图1 不同施肥处理下对玉米产量的变化

Fig.1 Changes in maize yield with different fertilization treatments

表 1 不同氮肥处理的产量及产量构成

Table 1 Yield and yield components of different nitrogen fertilizer treatments

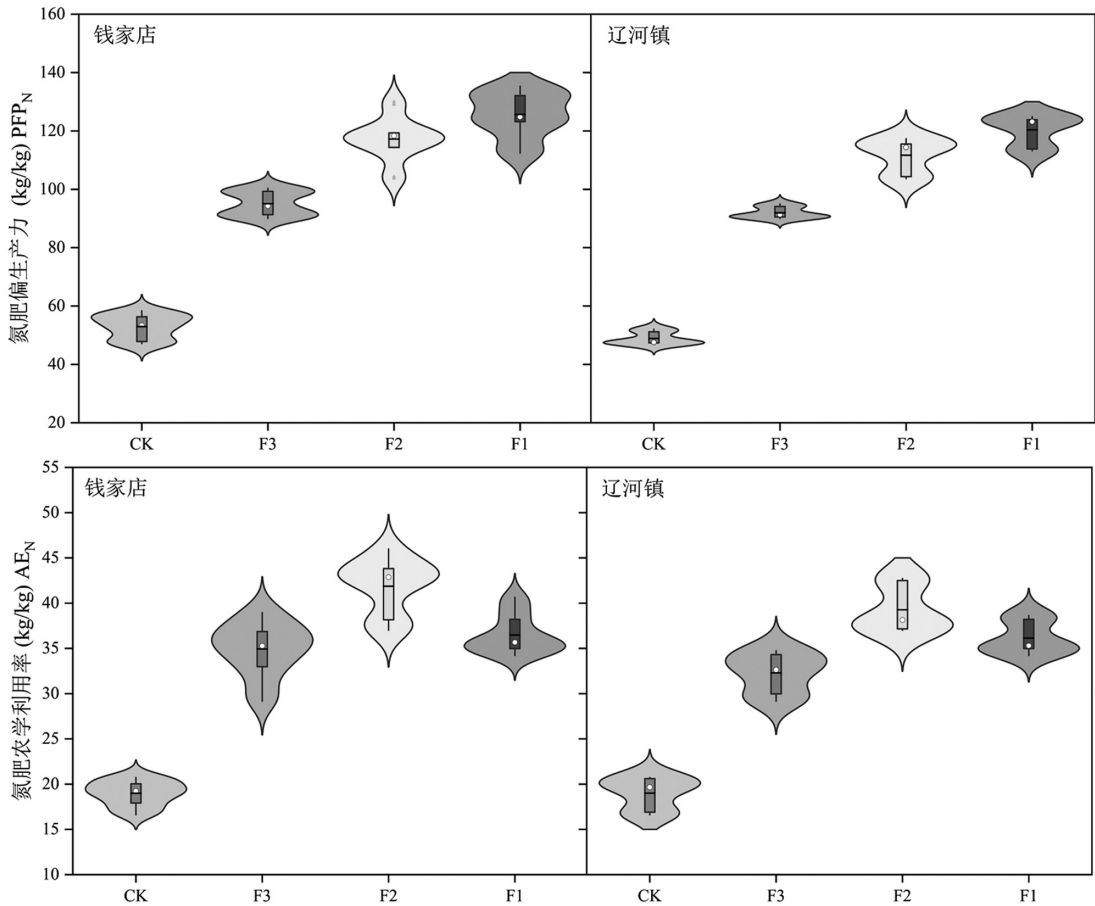
地 点	年 份	处 理	产量(t/hm ²)	收获穗数(×10 ⁴ 株/hm ²)	穗粒数(粒)	千粒重(g)
Location	Year	Treatment	Yield	Ears	Kernels per spike	1 000-kernel weight
钱家店镇	2020	CK	17.04 b	8.67 a	532.06 b	411.03 b
		F3	17.94 a	8.57 a	561.18 a	446.73 a
		F2	17.92 a	8.67 a	564.11 a	441.87 a
		F1	15.63 c	8.61 a	509.62 c	410.36 c
		F0	10.95 d	8.61 a	472.23 d	386.17 d
	2021	CK	16.66 b	8.81 a	531.85 b	427.17 b
		F3	17.74 a	8.81 a	564.24 a	445.11 a
		F2	17.54 a	8.93 a	566.48 a	448.75 a
		F1	15.34 c	8.81 a	511.30 c	409.75 c
		F0	11.32 d	8.84 a	473.41 d	381.54 d
	2022	CK	16.04 b	8.81 a	503.48 b	411.25 b
		F3	16.92 a	8.83 a	543.61 a	443.95 a
		F2	16.89 a	8.81 a	538.13 a	439.84 a
		F1	15.63 c	8.86 a	510.01 c	413.92 c
		F0	10.25 d	8.83 a	462.65 d	379.01 d
	2023	CK	15.76 b	8.89 a	526.20 b	409.84 b
		F3	16.67 a	8.81 a	563.14 a	436.11 a
		F2	16.62 a	8.88 a	559.81 a	434.03 a
		F1	14.33 c	8.83 a	520.47 c	409.82 c
		F0	10.01 d	8.83 a	486.39 d	397.11 d
辽河镇	2021	CK	12.95 b	8.67 a	530.56 b	424.15 b
		F3	14.28 a	8.59 a	563.48 a	444.11 a
		F2	14.09 a	8.62 a	565.48 a	449.15 a
		F1	10.27 c	8.63 a	521.36 c	408.48 c
		F0	7.82 d	8.63 a	490.01 d	348.14 d
	2022	CK	13.98 b	8.78 a	526.95 b	407.39 b
		F3	15.53 a	8.82 a	566.82 a	442.81 a
		F2	15.32 a	8.83 a	559.91 a	437.48 a
		F1	11.00 c	8.79 a	514.67 c	404.61 c
		F0	8.76 d	8.80 a	473.90 d	353.20 d
	2023	CK	13.70 b	8.77 a	511.11 b	402.84 b
		F3	15.36 a	8.80 a	559.42 a	432.52 a
		F2	15.24 a	8.79 a	550.61 a	428.61 a
		F1	11.95 c	8.78 a	521.46 c	401.94 c
		F0	8.65 d	8.78 a	493.35 d	351.19 d
	地 点		1 029.34**	3.55	131.29**	447.50**
	年 份		230.77**	9.55	58.19**	12.47**
	氮肥处理		8 448.10**	0.42	1 664.90**	3 056.48**
	地点×年份		357.04**	1.33	15.58**	11.60*
	地点×氮肥处理		211.94**	0.18	6.31	11.06*
	年份×氮肥处理		20.26	0.47	77.04*	15.74**
	地点×年份×氮肥处理		3.93*	0.53	5.92**	12.97*

注:不同小写字母表示同一年份处理间差异达5%显著水平;“*和**”分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 差异显著。下表同。

Note: Values followed by different small letters are significantly different at 5% among treatments in the same year. * and ** indicate significant different at $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively. The same below.

年份×氮肥处理和地点×年份×氮肥处理对收获穗数均无显著影响;地点、年份、氮肥处理、地点×年份和地点×年份×氮肥处理显著影响玉米的穗粒数($P<0.01$);地点、年份、氮肥处理和年份×氮肥处理显著

影响玉米的千粒重($P<0.01$)。
2.2 追施UAN对玉米氮肥偏生产力(PFP_N)和农学利用率(AE_N)的影响
不同氮肥处理对玉米的PFP_N和AE_N有显著影响



注:在小提琴图中线条表示数据的密度分布,线条的形状代表数据在不同取值上的分布情况。箱体图中框内圆点和实线分别表示中位数和平均数。
Note: In a violin plot, the lines indicate the density distribution of the data, and the shapes of the lines denote the distribution of the data at different values. The dots and solid lines in the box of the box plot represent the median and mean, respectively.

图2 不同氮肥处理下玉米氮肥偏生产力及农学利用率的变化
Fig.2 Changes in nitrogen fertilizer bias productivity and agronomic utilization of maize in different nitrogen fertilizer treatments

(图2)。两个试点UAN处理的玉米PFP_N和AE_N均显著高于CK处理,UAN的PFP_N随着施氮量的增加而降低。两个试点F2处理的AE_N最高,在钱家店镇试点,F2处理的AE_N较CK、F3和F1处理4年分别平均高131.23%、21.47%和19.49%。在辽河镇试点,F2处理的AE_N较CK、F3和F1处理3年分别平均高107.31%、21.82%和8.6%。综合PFP_N和AE_N的结果分析,F2处理有较高的氮肥生产效率。
由表2互作分析结果可知,地点、年份、氮肥处理、地点×年份、地点×氮肥处理、年份×氮肥处理和地点×年份×氮肥处理均显著影响玉米的PFP_N和AE_N($P<0.01$)。

表2 地点、年份、氮肥处理对PFP_N和AE_N影响的互作分析
Table 2 Interaction analysis of the effects of location, year, and nitrogen application treatment on PFP_N and AE_N

项目 Item	PFP _N	AE _N
地点	5.35**	1433.92**
年份	0.27**	829.16**
氮肥处理	227.96**	2451.77**
地点×年份	2.20**	10.50**
地点×氮肥处理	1.41**	368.99**
年份×氮肥处理	1.14**	33.04**
地点×年份×氮肥处理	1.34**	54.04**

2.3 追施UAN对玉米经济效益的影响

两地多年经济效益结果表明(表3),F2处理获得了最优的经济效益(11 916 ~ 19 976元/hm²)和产投比(1.49 ~ 2.07)。F2处理的产投比高于F3处理且无显著性差异。在钱家店镇试点,F2处理平均产值较CK处理增加1 992.3元/hm²,F2处理的平均经济效

益较CK处理增加2 392.3元/hm²;在辽河镇试点,F2处理平均产值较CK处理增加3 197元/hm²,平均经济效益较CK处理增加3 622.0元/hm²。相比普通尿素,追施UAN在不同土质下均可显著提高玉米产值及经济效益。

表3 不同氮肥处理对玉米经济效益的影响
Table 3 Effect of different nitrogen fertilizer treatments on the economic efficiency of maize

地 点 Location	年 份 Year	处 理 Treatment	成本投入(元/hm ²) Cost input			产 值 (元/hm ²) Output value	经济效益 (元/hm ²) Economic benefit	产投比 The rate of output to input
			肥料投入 Fertilizer input	其他投入 Other input	合 计 Total			
钱家店镇	2020	CK	3 290.0	14 655.0	18 050.0	34 761.6 b	16 816.6 b	1.94 b
		F3	3 395.0	14 655.0	17 620.0	36 597.6 a	18 547.6 a	2.03 a
		F2	2 965.0	14 655.0	17 190.0	36 556.8 a	18 936.8 a	2.07 a
		F1	2 535.0	14 655.0	18 050.0	31 885.2 c	14 695.2 c	1.85 b
		F0	1 477.4	14 655.0	16 132.4	22 338.0 d	6 205.7 d	1.38 c
	2021	CK	3 290.0	19 155.0	22 445.0	39 984.0 b	17 539.0 b	1.78 b
		F3	3 395.0	19 155.0	22 550.0	42 576.0 a	20 026.0 a	1.89 a
		F2	2 965.0	19 155.0	22 120.0	42 096.0 a	19 976.0 a	1.90 a
		F1	2 535.0	19 155.0	21 690.0	36 816.0 c	15 126.0 c	1.70 c
		F0	1 477.4	19 155.0	20 632.4	27 168.0 d	6 535.6 d	1.32 d
	2022	CK	3 390.0	22 155.0	25 545.0	36 892.0 b	11 347.0 b	1.44 b
		F3	3 395.0	22 155.0	25 550.0	38 916.0 a	13 366.0 a	1.52 a
		F2	2 965.0	22 155.0	25 120.0	38 847.0 a	13 727.0 a	1.55 a
		F1	2 535.0	22 155.0	24 690.0	35 949.0 c	11 259.0 b	1.46 b
		F0	1 447.9	22 155.0	23 602.9	23 575.0 d	-27.9 c	1.00 c
	2023	CK	3 490.0	22 155.0	25 645.0	38 612.0 b	12 967.0 b	1.51 b
		F3	3 395.0	22 155.0	25 550.0	40 841.5 a	15 291.5 a	1.60 a
		F2	2 965.0	22 155.0	25 120.0	40 719.0 a	15 599.0 a	1.62 a
		F1	2 535.0	22 155.0	24 690.0	35 108.5 c	10 418.5 c	1.42 c
		F0	1 418.4	22 155.0	23 573.4	24 524.5 d	951.1 d	1.04 d
辽河镇	2021	CK	3 290.0	16 155.0	19 445.0	31 080.0 b	11 635.0 b	1.60 b
		F3	3 395.0	16 155.0	19 550.0	34 272.0 a	14 722.0 a	1.75 a
		F2	2 965.0	16 155.0	19 120.0	33 816.0 a	14 696.0 a	1.77 a
		F1	2 535.0	16 155.0	18 690.0	24 648.0 c	5 958.0 c	1.32 c
		F0	1 477.4	16 155.0	17 632.4	18 768.0 d	1135.6 d	1.06 d
	2022	CK	3 390.0	20 355.0	23 745.0	32 154.0 b	8 409.0 b	1.35 b
		F3	3 395.0	20 355.0	23 750.0	35 719.0 a	11 969.0 a	1.50 a
		F2	2 965.0	20 355.0	23 320.0	35 236.0 a	11 916.0 a	1.51 a
		F1	2 535.0	20 355.0	22 890.0	25 300.0 c	2 410.0 c	1.11 c
		F0	1 447.9	20 355.0	21 802.9	20 148.0 d	-1 654.9 d	0.92 d
	2023	CK	3 490.0	22 155.0	25 645.0	33 565.0 b	7 920.0 b	1.31 b
		F3	3 395.0	22 155.0	25 550.0	37 632.0 a	12 082.0 a	1.47 a
		F2	2 965.0	22 155.0	25 120.0	37 338.0 a	12 218.0 a	1.49 a
		F1	2 535.0	22 155.0	24 690.0	29 277.5 c	4 587.5 c	1.19 c
		F0	1 418.4	22 155.0	23 573.4	21 192.5 d	-2 380.9 d	0.90 d

3 结论与讨论

大量研究表明,氮肥用量、施用频次和肥料配施等氮肥管理,均可在一定范围内影响玉米产量^[19-24]。前人研究多以常规尿素为主,对于新型液态氮肥-尿素硝铵溶液对玉米产量和氮肥利用率的研究相对较少^[25]。目前,国家提倡农业可持续发展和减肥增效的情势下,UAN作为一种具有良好肥效、施用灵活、节能环保的新型肥料,已经在氮肥减量增效、作物高产和兼顾环境方面取得一定效果^[26],UAN在中国未来作物生产中必将得到广泛的推广和应用。

有研究表明,相比普通尿素,UAN处理的玉米穗粒数和百粒重分别提高10.44%和2.37%,产量显著提高8.38%^[27]。本研究表明,UAN通过影响玉米的穗粒数和粒重进而影响玉米的产量,主要原因是UAN和普通尿素相比存在氮素形态差异,UAN发挥多态氮素的优势,提高氮素利用率,UAN中含有3种形态的氮源,长效氮和速效氮结合持续稳定为玉米生长提供所需氮源。尿素仅为酰胺态氮,施入土壤后经过一段时间脲酶的作用大部分水解成 NH_4^+ ,才能供玉米吸收利用。通过滴灌水肥一体化分次施肥将UAN少量多次的滴施到玉米根系附近,供玉米吸收利用,玉米在整个生长过程中根系附近均有多形态氮素供应,有效地提高了肥料的利用效率,促进玉米的生长和产量提高。在本研究中F2处理的子粒产量相比CK处理显著提高5.16%~11.24%。王寅等研究表明,在种植密度6.5万株/ hm^2 条件下减量分次施用UAN 160 kg/ hm^2 ,玉米产量达10.29~11.87 t/ hm^2 ^[28]。也有研究表明,在种植密度7.5万株/ hm^2 ,UAN施用量197.6 kg/ hm^2 时玉米产量达12.79~13.18 t/ hm^2 ^[29]。与前人研究相比,本研究玉米种植密度为9.0万株/ hm^2 ,施用UAN 250 kg/ hm^2 (F2)获得最高的产量达14.09~17.92 t/ hm^2 。产量提升主要原因是采用耐密型高产玉米品种,合理增加种植密度,有效地提高玉米收获穗数,进而提高了玉米产量。李广浩等研究表明,耐密型品种玉米增密后群体优势显著,产量相比低密度玉米群体显著提升7.74%~32.94%^[30],增加种植密度是提高玉米产量的直接有效途径。

在本研究中,辽河镇沙土地UAN的产量(14.09~15.32 t/ hm^2)低于钱家店黏壤土地块产量(16.67~17.92 t/ hm^2),沙土地的增产幅度高于黏壤土地块。钱家店镇试点F2处理的产量多年平均较CK处理提高了5.16%~5.46%,辽河镇试点F2处理产

量较CK处理提高8.8%~11.24%,可能的原因是沙土有机质含量较低,黏壤土则富含有机质。普通尿素所含氮源在单一施用过程中需要一定时间的转化,沙土地块可能存在短时间缺氮,导致产量较低;黏壤土有机质含量高,在氮源转化过程中不存在短时间缺氮,产量较高。在同样分次施用UAN量一致的情况下,与CK处理相比较,沙土地的增产幅度高于黏壤土。在滴灌水肥一体化条件下,UAN能促进玉米对氮素的吸收和利用^[32]。马荣辉等在华北平原潮土区开展UAN的研究,结果表明,UAN相比普通尿素,纯氮减量20%,玉米产量相比尿素无显著差异, AE_N 较尿素显著提高19.7%, PFP_N 提高22.77%^[33]。本研究中F2处理纯氮投入量相比CK处理减少近50%,两个试点产量平均提高7.26%, PFP_N 和 AE_N 分别提高了118.14%和120.98%。也有研究表明,在同等施氮水平下,UAN相比尿素在减少纯氮投入量的情况下作物产量没有降低,进而提高氮肥利用效率^[34]。氮肥的优化管理是作物高产、高效和农业绿色可持续生产的有效途径,通过优化UAN的施肥量,可以显著提高玉米产量和氮肥生产效率,实现高产和高效的协同。目前的结果没有考虑到土壤氮的平衡,还需进一步深入研究。

综合产量、氮肥利用率和经济效益3个方面考虑,在滴灌水肥一体化密植条件下,追施UAN 223.72~268.74 kg/ hm^2 可在西辽河平原区域获得较高的产量,同时显著减少氮肥投入,提高经济效益,是未来东北高产春玉米生产过程中高产稳产、减肥增效的有效途径。

参考文献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Progress and prospects of maize cultivation research in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] 严建兵,赵久然. 密植高产-我国玉米育种的最核心目标[J]. 生物技术通报,2023,39(8):1-3.
YAN J B, ZHAO J R. Dense planting for high yield-the most central goal of maize breeding in China[J]. Biotechnology Bulletin, 2023, 39(8): 1-3. (in Chinese)
- [3] XU W J, LIU C W, WANG K R, et al. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China[J]. Field Crops Research, 2017, 212, 126-134.
- [4] ZHANG G Q, SHEN D P, XIE R Z, et al. Optimizing planting density to improve nitrogen use of super high-yield maize[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(5): 4147-4158.
- [5] LIU G Z, LIU W M, HOU P, et al. Reducing maize yield gap by matching plant density and solar radiation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2): 363-370.

- [6] WANG Z, GUO Y N, WANG K R, et al. Effects of planting density on test weight and related indexes of maize[J]. *Crop Science*, 2023, 63(6): 3470–3481.
- [7] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥科学报*, 2014, 20(4): 783–795.
JU X T, GU B J. Current situation, problems and trends of nitrogen fertilizer application in farmland in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783–795. (in Chinese)
- [8] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3161–3171.
ZHANG W F, MA L, HUANG G Q, et al. Nitrogen fertilizer development, contribution and challenges in China[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2013, 46(15): 3161–3171. (in Chinese)
- [9] 刘鹏,董树亭,李少昆,等. 高产玉米氮素高效利用[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(12): 2232–2237.
LIU P, DONG S T, LI S K, et al. Efficient utilization of nitrogen in high-yielding maize[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2017, 50(12): 2232–2237. (in Chinese)
- [10] ZHAI J, ZHANG Y M, ZHANG G Q, et al. Nitrogen application and dense planting to obtain high yields from maize[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6): 1308.
- [11] GUO C, LIU X F, HE X F. A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application[J]. *Science of the Total Environment*, 2022: 831.
- [12] HOU P, LIU Y, LIU W M, et al. How to increase maize production without extra nitrogen input[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020: 160.
- [13] REN B Z, HUANG Z Y, LIU P, et al. Urea ammonium nitrate solution combined with urease and nitrification inhibitors jointly mitigate NH_3 and N_2O emissions and improves nitrogen efficiency of summer maize under fertigation[J]. *Field Crops Research*, 2023: 296.
- [14] 邓兰生,涂攀峰,叶倩倩,等. 滴施液体肥对甜玉米生长、产量及品质的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(1): 119–122.
DENG L S, TU P F, YE Q Q, et al. Effects of drip application of liquid fertilizer on growth, yield and quality of sweet corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(1): 119–122. (in Chinese)
- [15] MA Z T, REN B Z, ZHAN B, et al. Optimising the root traits of summer maize to improve nutrient uptake and utilisation through rational application of urea ammonium nitrate solution[J]. *Plant Soil and Environment*, 2022, 68(2): 98–107.
- [16] 王高旭,田耕,周佳丰,等. 稳定性液体氮肥在保护性耕作黑土中施用效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(4): 137–145.
WANG G X, TIAN G, ZHOU J F, et al. Effect of stable liquid nitrogen fertilizer application in conservation tillage black soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 137–145. (in Chinese)
- [17] 邵宇辉,董思奇,李晓宇,等. 增效液体氮肥在苏打盐碱土中的应用效果研究[J]. *玉米科学*, 2022, 30(2): 145–153.
SHAO Y H, DONG S Q, LI X Y, et al. Research on the application effect of synergistic liquid nitrogen fertilizer in soda saline soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(2): 145–153. (in Chinese)
- [18] LI X Y, ZHANG X Y, WANG S J, et al. The combined use of liquid fertilizer and urease/nitrification inhibitors on maize yield, nitrogen loss and utilization in the mollisol region[J]. *Plants-Basel*, 2023, 12(7): 1486.
- [19] 宁东峰,秦安振,刘战东,等. 滴灌施肥下水氮供应对夏玉米产量、硝态氮和水氮利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 28–35.
NING D F, QIN A Z, LIU Z D, et al. Effects of water and nitrogen supply on yield, nitrate nitrogen and water nitrogen use efficiency of summer maize under drip irrigation fertilization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9): 28–35. (in Chinese)
- [20] 魏淑丽,王志刚,于晓芳,等. 施氮量和密度互作对玉米产量和氮肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(3): 382–391.
WEI S L, WANG Z G, YU X F, et al. Effects of nitrogen application and density interactions on corn yield and nitrogen fertilizer use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(3): 382–391. (in Chinese)
- [21] 胥子航,王睿,刘育旺,等. 地膜和秸秆覆盖提高春玉米产量与氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥科学报*, 2023, 29(11): 1991–2003.
XU Z H, WANG R, LIU Y W, et al. Improvement of spring maize yield and nitrogen fertilizer use efficiency by mulching with mulch and straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(11): 1991–2003. (in Chinese)
- [22] 蔡媛媛,王瑞琪,王丽丽,等. 华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 503–510.
CAI Y Y, WANG R Q, WANG L L, et al. Effects of different nitrogen application rates and fertilization patterns on crop yield and nitrogen fertilizer utilization in the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 503–510. (in Chinese)
- [23] 刘云柯,李丰琇,孙飞雪,等. 干旱区覆膜滴灌和施氮量对夏玉米生长发育和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(4): 140–147.
LIU Y K, LI F X, SUN F X, et al. Effects of film-covered drip irrigation and nitrogen application on growth, development and yield of summer maize in arid areas[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4): 140–147. (in Chinese)
- [24] 孟亚轩,马玮,姚旭航,等. 玉米产量对氮肥的响应因素研究[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(7): 153–160.
MENG Y X, MA W, YAO X H, et al. Study on the response factors of maize yield to nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(7): 153–160. (in Chinese)
- [25] 张鲁云,何义川,杨怀君,等. 液体施肥机械发展现状与现代农业关系分析[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(4): 34–40.
ZHANG L Y, HE Y C, YANG H J, et al. Analysis of the development status of liquid fertilizer application machinery in relation to modern agriculture[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(4): 34–40. (in Chinese)
- [26] 刘兆辉,薄录吉,李彦,等. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 1–8.
LIU Z H, BO L J, LI Y, et al. A review of nitrogen fertilizer reduction application techniques and their effects on crop yield and ecological environment[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016

- (4): 1–8. (in Chinese)
- [27] 张运红,姚健,宝德俊,等. 尿素硝酸铵溶液对玉米产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 113–121.
- ZHANG Y H, YAO J, BAO D J, et al. Effects of urea ammonium nitrate solution on corn yield, quality and nutrient uptake[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 113–121. (in Chinese)
- [28] 王寅,徐卓,李博凝,等. 尿素硝铵溶液对黑土区春玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(4): 718–727.
- WANG Y, XU Z, LI B N, et al. Effects of urea ammonium nitrate solution on yield and nitrogen uptake and utilization of spring corn in black soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(4): 718–727. (in Chinese)
- [29] 邵继承,韩镁琪,杨恒山,等. 浅埋滴灌下尿素减量配施UAN对春玉米干物质积累及氮效率的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 136–144.
- TAI J C, HAN M Q, YANG H S, et al. Effects of urea reduction with UAN on dry matter accumulation and nitrogen efficiency of spring corn under shallow buried drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(3): 136–144. (in Chinese)
- [30] 李广浩,刘娟,董树亭,等. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2247–2258.
- LI G H, LIU J, DONG S T, et al. Effects of dense planting and nitrogen fertilizer dosage on yield and nitrogen use efficiency of different dense-tolerant summer maize varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2247–2258. (in Chinese)
- [31] 王绍新,李楠,王传娟,等. 国内玉米高效节水灌溉水肥一体化技术研究现状与展望[J]. 节水灌溉, 2023(8): 121–128.
- WANG S X, LI N, WANG C J, et al. Current status and outlook of research on water and fertilizer integration technology for high-efficiency water-saving irrigation of corn in China[J]. Water Saving Irrigation, 2023(8): 121–128. (in Chinese)
- [32] 郭晓旭,杨恒山,邵继承,等. 浅埋滴灌下尿素减量配施UAN对春玉米根系形态及其生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 127–136.
- GUO X X, YANG H S, TAI J C, et al. Effects of urea reduction with UAN on root morphology and physiological characteristics of spring maize under shallow buried drip irrigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(6): 127–136. (in Chinese)
- [33] 马荣辉,薄录吉,杨武杰,等. 尿素硝酸铵溶液对玉米产量、养分吸收及潮土氮素积累的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(7): 80–86.
- MA R H, BO L J, YANG W J, et al. Effects of urea ammonium nitrate solution on corn yield, nutrient uptake and nitrogen accumulation in tidal soil[J]. Shandong Agricultural Science, 2023, 55(7): 80–86. (in Chinese)
- [34] ZHANG Y H, YAO J, BAO D J, et al. Effects of ammonium nitrate solution on yield, quality and nutrient uptake in maize[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 113–121.

(责任编辑: 栾天宇)