

施氮量及追氮时期对滴灌夏玉米 干物质积累及氮素利用的影响

刘 帅,徐宇凡,贾 靖,孟繁港,朱紫鑫,张玉璐,赵长星

(青岛农业大学农学院,山东省旱作农业技术重点实验室,山东 青岛 266109)

摘 要:选用夏玉米杂交种‘郑单 958’为试验材料,以施氮量 N1(180 kg·hm⁻²)、N2(210 kg·hm⁻²) 为主因素,追氮时期 S1(拔节期+大喇叭口期)、S2(拔节期+开花期)、S3(拔节期+大喇叭口期+开花期)为副因素,以传统畦灌条件下(施氮量 240 kg·hm⁻²)拔节期一次性追肥处理(CK1)和拔节期+大喇叭口期追肥处理(CK2)作为对照,研究滴灌水肥一体化条件下施氮量和追氮时期对夏玉米干物质积累、产量形成及植株氮素转运与积累的影响。结果表明:与 CK1 相比 N1S3、N2S3 处理 2020 年成熟期地上部干物质积累量分别提高 6.91% 和 8.30%,2021 年分别提高 2.28% 和 3.90%;2020 年氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力分别提高 84.59%、61.43%、55.44%、34.60%,2021 年分别提高 90.82%、64.38%、50.69%、29.40%;2020 年 0~20 cm 土层硝态氮残留量分别提高 15.63、16.45 kg·hm⁻²,2021 年分别提高 5.19、5.64 kg·hm⁻²;2020 年产量分别提高 16.56%、17.77%,2021 年分别提高 13.03%、13.48%。综合分析得出,增加追氮次数可以显著增加夏玉米地上部干物质积累量,增大玉米植株氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力和 0~20 cm 土层硝态氮残留量,增加夏玉米产量。N1S3、N2S3 处理产量显著高于 CK1,但是两处理各指标差异并不显著,N1S3 处理较 N2S3 处理减少了氮肥的投入,维持了较高的干物质积累量、氮素积累量和产量,增加了氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力,因此 N1S3 为本试验的最优处理组合。

关键词:夏玉米;滴灌水肥一体化;干物质积累;氮素利用;产量

中图分类号:S513;S365 **文献标志码:**A

Effects of nitrogen application rate and topdressing stage on dry matter accumulation and nitrogen utilization of summer maize under drip irrigation

LIU Shuai, XU Yufan, JIA Jing, MENG Fangang, ZHU Zixin, ZHANG Yulu, ZHAO Changxing

(College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory
of Dryland Farming Technology, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: Summer maize hybrid ‘Zhengdan 958’ was selected as the test material and two nitrogen application levels of nitrogen application rate N1 (180 kg·hm⁻²) and N2 (210 kg·hm⁻²) were set to explore the effects of nitrogen application rate and timing of topdressing nitrogen on dry matter accumulation, yield formation and plant nitrogen transport and accumulation of summer maize under the conditions of drip irrigation and fertilizer integration. The combination of nitrogen application periods of S1 (jointing stage + belling stage), S2 (jointing stage + flowering stage), S3 (jointing stage + belling stage + flowering stage) in nitrogen dressing period was designed. Under traditional irrigation conditions, the nitrogen application amount was 240 kg·hm⁻², one-time topdressing treatment for CK1 at jointing stage, and topdressing treatment for CK2 at jointing stage + belling stage were set up. There were 8 treatments in total. The results showed that compared with CK1, the accumulation of dry matter in the aboveground dry matter in the mature stage of N1S3 and N2S3 in 2020 increased by 6.91% and 8.30%, respectively, and in-

收稿日期:2022-12-01

修回日期:2023-02-08

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010716);山东省新旧动能转换重大产业攻关项目(2021-54);山东省重点研发计划项目(2022CXPT009);国家重点研发计划项目(2018YFD0300604);中国工程院第352场中国工程科技论坛项目

作者简介:刘帅(1998-),男,山东阳信人,硕士研究生,研究方向为玉米节水高产栽培。E-mail:978829975@qq.com

通信作者:赵长星(1976-),男,山东曹县人,教授,主要从事作物节水高产栽培生理生态研究。E-mail:zhaochangxing@126.com

creased by 2.28% and 3.90% in 2021. In 2020, the agronomic use efficiency and nitrogen fertilizer partial productivity of nitrogen fertilizer increased by 84.59%, 61.43%, and 55.44%, 34.60%, respectively, and in 2021, they increased by 90.82%, 64.38%, and 50.69%, 29.40%, respectively. In 2020, the nitrate nitrogen residues in 0~20 cm soil increased by 15.63 kg · hm⁻² and 16.45 kg · hm⁻², respectively, and increased by 5.19 kg · hm⁻² and 5.64 kg · hm⁻² in 2021. The yield increased by 16.56% and 17.77% in 2020 and 13.03% and 13.48% in 2021. Increasing the number of topdressings significantly increased the accumulation of dry matter in the above ground of summer maize, the agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer, the productivity of nitrogen fertilizer bias and the nitrate nitrogen residue in 0~20 cm soil layer of maize plants, and the yield of summer maize based on the comprehensive analysis. The yield of N1S3 and N2S3 treatments was significantly higher than that of CK1, but there was no significant difference in each index between the two treatments. Compared with N2S3 treatment, N1S3 treatment reduced the input of nitrogen fertilizer, maintained higher dry matter accumulation, nitrogen accumulation and yield, and increased the agronomic use efficiency and partial productivity of nitrogen fertilizer. Therefore, N1S3 was the optimal treatment combination for this experiment.

Keywords: summer maize; integrated drip irrigation and fertilization system; dry matter accumulation; nitrogen utilization; yield

玉米作为我国第一大粮食作物,2020 年全国种植面积达到 4.13×10⁷ hm²,产量达到 2.61×10⁸ t,在保障国民经济和粮食安全中占有重要地位^[1-2]。黄淮海地区是我国玉米主产区,种植面积和产量约占全国的 33.3%^[3-4]。氮肥是影响玉米生长发育的重要营养元素,正确施氮可以显著增加玉米产量^[5-6],但因追求玉米高产,过量施氮现象越发严重^[7-8]。

我国是目前最大的氮肥消耗国,用量占全球 30%以上,但是我国氮肥利用率仅为 30%~35%,远低于发达国家的平均水平^[9-10]。过度施用氮肥会导致土壤中硝态氮淋失,降低氮肥利用率,还会引起一系列环境问题^[11-12]。黄淮海地区降雨时空分布不均,玉米生长季雨热同期,但阶段性干旱时有发生^[13-14],严重影响着玉米的生长发育及生产的稳定性。前人研究表明:玉米生育期对氮肥的需求很大,单次过量施肥不仅不会增加玉米产量,氮肥在短期内也不会被玉米全部吸收,造成氮肥浪费^[7,15]。滴灌水肥一体化技术克服传统施肥、灌溉的不精准和耗费劳动力问题^[5,16],又可以根据植株需求,少量多次地直接将肥料输送到作物根区的土壤表面^[17-18],可以解决后期追肥难的问题,维持玉米生长季养分的持续供应。前人研究表明:滴灌条件下,分次追施氮肥会显著提高玉米植株干物质积累量,提高植株氮素积累和转运量,有利于产量的形成^[19-20];适量增施氮肥可以增加土壤硝态氮含量的积累^[21]。但是在黄淮海平原夏玉米实际生产中,基于滴灌条件下,施氮量和追氮时期组合对夏玉米干物质积累、植株氮素积累与转运及产量形成的研究较少。因此,本试验在滴灌水肥一体化条件下,探

究不同施氮量和追氮时期对夏玉米干物质积累、植株氮素转运与积累及产量的影响,以期为黄淮海东部地区夏玉米滴灌水肥一体化高效生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2020 年 6 月—2021 年 10 月两个夏玉米生长季在青岛农业大学胶州现代农业示范园(35.53°N,119.58°E)进行。该地位于黄淮海平原的东部区域,属半湿润易旱区温带季风气候,2020 年玉米生长期内降雨量为 638.2 mm(丰水年),2021 年玉米生长期内降雨量为 387.8 mm(平水年)。2020 年和 2021 年玉米生育期降雨量分布见图 1。该地土壤类型为砂姜黑土,播种前 0~20 cm 土层的土壤理化性质为:碱解氮 122.5 mg · kg⁻¹,速效磷 17.05 mg · kg⁻¹,速效钾 134 mg · kg⁻¹,有机质 17.2 g · kg⁻¹,pH 值 7.7。

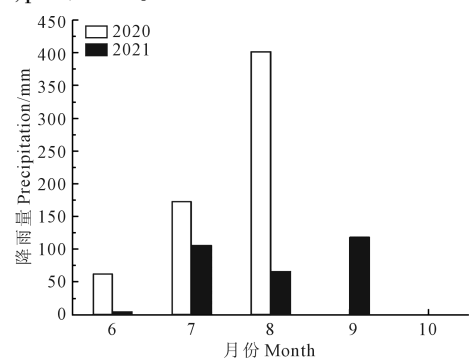


图 1 2020 年和 2021 年夏玉米全生育期降雨量分布
Fig.1 Rainfall distribution during the whole growth period of summer maize in 2020 and 2021

1.2 试验材料

本试验玉米品种为玉米杂交种‘郑单 958’,设置施氮量和追肥时期两个因素,施氮量设置两个水平(以纯氮计):180 kg · hm⁻²(N1)、210 kg · hm⁻²(N2);设置 3 个追肥时期:拔节期+大喇叭口期(S1)、拔节期+开花期(S2)、拔节期+大喇叭口期+开花期(S3);并设置施氮量 240 kg · hm⁻²传统畦灌为对照处理(CK),其中 CK1 处理在拔节期一次性追施氮肥,CK2 处理在拔节期和大喇叭口期追施氮肥,试验共计 8 个处理,采用随机区组设计,3 次重复,具体施肥方案见表 1。试验田采用复合肥(N:P:K=15:15:15),底施纯氮、K₂O 和 P₂O₅各 90 kg · hm⁻²,肥料随播种错行施入,其余追施氮肥为普通尿素(含氮 46%),氮肥随灌水等量分次追施,每小区定量灌溉 5 mm,灌水量以水表记录,各时期灌水量见表 2。试验地每小区长 60 m,宽 5.2 m,小麦收获后进行贴茬直播,夏玉米行距 60 cm,种植密度均为75 000株 · hm⁻²,滴灌带一管一行铺放,两年试验处理为连续定位试验,夏玉米生育进程见表 3。

表 1 试验施肥方案

Table 1 Trial fertilization scheme

处理 Treatment	底施氮量 Basic fertilizer rate /(kg · hm ⁻²)	追施氮量 Topdressing rate/(kg · hm ⁻²)		
		拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Belling stage	开花期 Flowering stage
N1S1	90	45	45	0
N1S2	90	45	0	45
N1S3	90	30	30	30
N2S1	90	60	60	0
N2S2	90	60	0	60
N2S3	90	40	40	40
CK1	90	150	0	0
CK2	90	75	75	0

表 2 各生育期补灌水量

Table 2 Irrigation volume at different stages

处理 Treatment	拔节期/mm Jointing stage	大喇叭口期/mm Belling stage	开花期/mm Flowering stage
N1S1	5	5	0
N1S2	5	0	5
N1S3	5	5	5
N2S1	5	5	0
N2S2	5	0	5
N2S3	5	5	5
CK1	5	0	0
CK2	5	5	5

表 3 夏玉米生育进程(m-d)

Table 3 Growth process of summer maize

年份 Year	播种期 Sowing stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Belling stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
2020	06-20	07-14	08-05	08-14	10-08
2021	06-22	07-17	08-08	08-16	10-04

1.3 测定项目及方法

1.3.1 夏玉米地上部的干物质积累 于夏玉米开花期和成熟期每个小区取 3 株长势一致、有代表性的植株,每个处理 3 次重复,将各器官按叶片、茎秆(含雄穗)、苞叶、穗轴、籽粒分离,于烘箱 105℃杀青 30 min,75℃烘干至恒重,用电子天平(精确度 0.01 g)称干质量并记录,最后乘以种植密度换算成群体生物量(kg · hm⁻²)。

花前干物质转运量(DMTAA,kg · hm⁻²)=开花期干物质积累量-(成熟期干物质积累量-籽粒产量)

花后干物质同化量(DMAAA,kg · hm⁻²)=成熟期干物质积累量-开花期干物质积累量

收获指数(HI)=籽粒产量/干物质积累量

1.3.2 夏玉米地上部的氮素积累 将烘干后的样品磨粉、过筛,采用半微量凯氏定氮法测定各器官氮素含量。

植株氮素积累量(kg · hm⁻²)=植株氮素含量×干物质积累量

氮素转运量(NT,kg · hm⁻²)=开花期植株氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

氮素转运率(NTR)=氮素转运量/开花期植株氮素积累量

氮收获指数(NHI)=籽粒氮积累总量/植株氮积累总量

氮肥偏生产力(NPFP)=单位面积产量/单位面积施氮量

氮肥农学利用效率(NAE)=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/施氮量

氮素籽粒生产效率(NGPE)=籽粒产量/氮素积累总量

1.3.3 土壤硝态氮含量 在夏玉米成熟期用土钻钻取 0~100 cm 的土层,每 20 cm 为一层,分装冷冻待测。测定时取解冻鲜土 5 g 于可封闭塑料瓶中,加入 1 mol · L⁻¹的 KCl 溶液 50 ml,用封口膜密封,摇床振荡 30 min,振速为 250 r · min⁻¹,滤纸过滤,滤液用 AA3 连续流动分析仪(AutoAnalyzer-Ⅲ,SEAL 公司,德国)测定硝态氮(NO₃⁻-N)含量,各土层硝态氮的计算参考以下公式:

某土层(NO₃⁻-N)供应量(kg · hm⁻²)=土层深度(cm)×土壤容重(g · cm⁻³)×土壤(NO₃⁻-N)含量(mg · kg⁻¹)/10

玉米播前采用环刀法测定 0~100 cm 土壤容重,每 20 cm 为一层进行测定。

1.3.4 夏玉米产量及其构成因素 在玉米成熟期

取每个小区中部 5 m 3 行(9 m²)果穗,每个小区随机重复 3 次,统计有效穗数,自然干燥,选取 10 穗有代表性的果穗进行室内考种,产量按照籽粒 14%含水量计算。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行计算,SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 施氮量和追氮时期对夏玉米地上部干物质积累量及产量的影响

如表 4 所示,施氮量和追氮时期对夏玉米地上部干物质积累量有显著影响。在滴灌条件下,夏玉米成熟期地上部干物质质量和收获指数随着追氮次数的增加而增加,但两种氮肥梯度间差异不显著,表明分次追肥可以维持夏玉米地上部干物质积累量,减少氮肥投入。增加追氮次数和施氮量可以显著增加夏玉米花前干物质转运量,具体趋势表现为:N1S3、N2S3>CK2>N2S1、N2S2>N1S1、N1S2>CK1,两年试验期的规律一致。增加追氮次数可以显著增加夏玉米花后干物质同化量,N1S3、N2S3 处理显著高于其他处理。由此可知,增加追氮次数有利于增加夏玉米干物质积累量,满足夏玉米各生育期氮素需求,减少氮肥的投入。

如表 4 所示,增加追氮次数可以显著提高夏玉米籽粒产量。进一步分析表明:N1S3、N2S3 处理产量最高,且显著高于其他处理,两年试验期的规律一致。2020 年,N1S3、N2S3 处理产量相比 CK1 增加了 16.56%和 17.77%,2021 年,N1S3、N2S3 处理产量相比 CK1 增加了 13.03%和 13.48%。2020 年夏玉米生育期内降雨过多、降雨量过大,导致 2020 年产量低于 2021 年。

2.2 施氮量和追氮时期对夏玉米地上部氮素积累的影响

增加施氮量可以显著增加夏玉米地上部氮素积累量,在相同施氮量条件下,增加追氮次数可以显著增加成熟期地上部氮素积累量(表 5)。在相同施氮量条件下,增加追氮次数可以显著增加夏玉米地上部氮素转移量、氮素转移率、氮收获指数和氮素籽粒生产效率;在相同追氮时期条件下,增加施氮量对夏玉米地上部氮素转移量、氮素转移率、氮收获指数和氮素籽粒生产效率影响并不显著,两年试验期的规律一致,表明增加追氮次数有利于更好地满足夏玉米对氮素的需求。

在相同施氮量条件下,增加追氮次数可以显著提高夏玉米氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力;适当减少施氮量会显著提高夏玉米氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力,两年试验期的规律基本一致。2020 年,夏玉米氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力

表 4 不同施氮量和追氮时期对夏玉米地上部干物质积累量及产量的影响
Table 4 Effects of different nitrogen rates and application periods on aboveground dry matter accumulation and yield of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	地上部干物质积累量/(kg·hm ⁻²) Aboveground dry matter accumulation		收获指数 HI	花前干物 质转运量 DMTAA /(kg·hm ⁻²)	花后干物 质同化量 DMAA /(kg·hm ⁻²)	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
		开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage				
2020	N1S1	9062.60b	16303.05bc	0.579b	1101.65d	7240.45cd	8342.10e
	N1S2	8466.16c	15853.54e	0.580b	1148.73d	7387.38b	8536.11cd
	N1S3	9012.08b	16729.63a	0.599a	1573.45ab	7717.55a	9291.00a
	N2S1	8967.54b	16260.74cd	0.579b	1144.95c	7293.19bc	8438.15de
	N2S2	8570.14c	15957.15de	0.577b	1280.47c	7387.01b	8667.48b
	N2S3	9197.62ab	16946.14a	0.593a	1638.88a	7748.52a	9387.41a
	CK1	8539.20c	15647.71e	0.574b	862.30e	7108.50b	7970.90f
	CK2	9475.39a	16617.84ab	0.580b	1477.57b	7142.46d	8620.02bc
2021	N1S1	11012.47b	18802.81cd	0.540bc	1535.54c	7790.38cd	9325.93d
	N1S2	10014.17c	17903.10e	0.541bc	1422.14e	7888.97b	9311.11d
	N1S3	10949.77b	19178.73bc	0.553a	1826.59a	8228.96a	10055.56a
	N2S1	11021.67b	18795.12cd	0.541bc	1645.04b	7773.48d	9418.52c
	N2S2	9993.457c	17837.18e	0.537c	1497.02cd	7843.72bc	9340.74d
	N2S3	11280.67b	19482.10b	0.552a	1872.64a	8201.44a	10074.07a
	CK1	11292.77b	18750.64d	0.522d	1438.41de	7457.89e	8896.30e
	CK2	12467.47a	20306.72a	0.546ab	1886.63a	7839.30bc	9725.93b

注:同列数据后不同小写字母表示相同年份处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments in the same year (P<0.05). The same below.

N1S3 和 N2S3 处理较 CK1 处理分别提高了84.59%、61.43%、55.44%、34.60%；2021 年，夏玉米氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力 N1S3 和 N2S3 处理较 CK1 处理分别提高了 90.82%、64.38%、50.69%、29.40%。

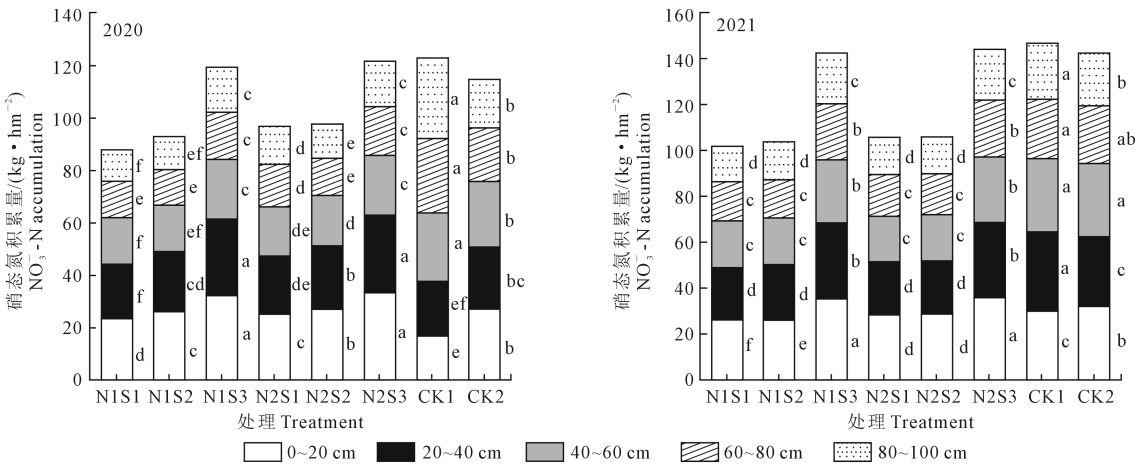
2.3 施氮量和追氮时期对夏玉米土壤硝态氮残留量的影响

夏玉米成熟期土壤硝态氮残留量变化如图 2 所示。2020 年夏玉米成熟期 0~20 cm 土层土壤硝态氮残留量 N1S3、N2S3 处理最高且显著高于其他处理,CK1 最低,且显著低于其他处理,CK1 处理土壤

硝态氮残留量随着土层深度的增加而增加,可能是因为本年度玉米生育期内降雨过多导致,氮素存在淋溶的风险。2021 年夏玉米成熟期 0~20 cm 土层土壤硝态氮残留量相比 2020 年进一步提高,N1S3、N2S3 处理显著高于其他处理;CK1 处理土壤硝态氮残留量峰值出现在 20~40 cm 土层,其他处理峰值均出现在 0~20 cm 土层;CK1、CK2 处理 40~100 cm 土层土壤硝态氮残留显著高于其他处理。因此,增加施氮量可以提高土层硝态氮残留量,但是同时氮素存在淋溶的风险。

表 5 不同施氮量和追氮时期对夏玉米地上部氮素积累量的影响

Table 5 Effects of different nitrogen rates and application stages on aboveground nitrogen accumulation of summer maize									
年份 Year	处理 Treatment	地上部氮素积累量/(kg·hm ⁻²) Aboveground nitrogen accumulation		氮素转移量 NT /(kg·hm ⁻²)	氮素转移率 NTR	氮收获指数 NHI	氮肥农学 利用效率 NAE /(kg·kg ⁻¹)	氮素籽粒 生产效率 NGPE /(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏 生产力 NPFP /(kg·kg ⁻¹)
		开花期	成熟期						
		Flowering stage	Maturity stage						
2020	N1S1	99.82bc	203.85d	28.82bc	0.29de	0.62cd	21.14d	40.93b	46.35c
	N1S2	83.80d	206.22d	19.57cd	0.23e	0.66b	22.22c	41.39b	47.42b
	N1S3	98.94c	210.05c	51.42a	0.52ab	0.74a	26.41a	44.23a	51.62a
	N2S1	111.90a	205.56d	37.70b	0.34cd	0.61d	18.58f	41.05b	40.18f
	N2S2	85.06d	209.18c	15.77d	0.18ef	0.64bc	19.67e	41.44b	41.27e
	N2S3	109.81ab	213.93b	59.05a	0.54a	0.72a	23.10b	43.88a	44.70d
	CK1	92.74cd	214.68ab	10.00d	0.11f	0.58e	14.31h	37.13d	33.21h
	CK2	119.04a	217.37a	50.94a	0.43bc	0.65b	17.01g	39.66c	35.92g
2021	N1S1	163.48c	225.83bc	107.49c	0.66d	0.73c	17.33c	41.30b	51.81b
	N1S2	125.76e	223.39c	72.59d	0.58ef	0.74c	17.24c	41.68b	51.73b
	N1S3	165.07bc	231.83ab	121.05a	0.73a	0.79a	21.38a	43.38a	55.86a
	N2S1	169.12b	226.67bc	114.11b	0.68cd	0.73c	15.29d	41.56b	44.85d
	N2S2	130.08e	226.76bc	75.25d	0.80e	0.73c	14.92e	41.20b	44.48e
	N2S3	168.29bc	231.67ab	119.41ab	0.71ab	0.76b	18.41b	43.49a	47.97c
	CK1	138.27d	226.77bc	76.08d	0.55f	0.70d	11.20g	39.25c	37.07g
	CK2	182.69a	238.23a	125.67a	0.69bc	0.74c	14.66f	40.84b	40.53f



注:数据为各处理的平均值±标准差,不同小写字母表示在相同土层处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The data is the average value ± standard deviation of each treatment, and different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same soil layer (P<0.05).

图 2 不同施氮量和追氮时期对夏玉米成熟期 0~100 cm 土壤剖面硝态氮残留量的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen rates and application periods on residual NO₃-N content in 0~100 cm soil profile at maturity stage of summer maize

3 讨 论

3.1 施氮量和追氮时期对夏玉米地上部干物质积累及产量的影响

前人研究表明:玉米植株干物质积累与转运对其产量形成有重要作用,提高干物质积累能力以及同化物向籽粒的转移能力、协调源库关系是提高玉米产量的有效途径^[22-24]。一次性施肥会降低玉米干物质积累量和产量,施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以显著促进玉米增产,增施氮肥至 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增产作用减弱^[25]。适时适量地为作物供应养分是实现增产和提高养分利用率的要求^[26]。王旭敏等^[27]研究表明适当节水减氮可以显著提高花前干物质转运量,且对玉米成熟期干物质积累量影响不显著。本研究表明:在定额灌溉、滴灌水肥一体化条件下,N1S3、N2S3 处理成熟期干物质积累量和收获指数最高,施氮量对夏玉米成熟期干物质积累量和收获指数影响并不显著,这与前人研究结果一致;本研究还发现与传统灌溉施肥处理(CK1、CK2)相比,增加追氮次数可以显著提高夏玉米成熟期干物质积累量、花前干物质转运量和花后干物质同化量,证明氮肥后移可以更好地满足夏玉米不同生育期对氮素的需求,对夏玉米干物质积累、转运与同化起促进作用,从而增加夏玉米产量。

3.2 施氮量和追氮时期对夏玉米地上部氮素积累的影响

养分的吸收、同化与转运直接影响着作物的生长和发育,从而影响着产量^[28]。前人研究表明:合理施氮可以提高玉米植株氮素积累量,而氮肥后移、分次施氮可以提高氮肥的利用,提高氮肥农学利用效率^[29-30]。本研究发现,增加施氮量和追氮次数可以显著提高夏玉米地上部氮素积累量。在定额灌溉、滴灌水肥一体化条件下,增加施氮量对夏玉米地上部氮素转移量、氮素转移率、氮收获指数和氮素籽粒生产效率影响并不显著;增加追氮次数可以显著增加夏玉米植株地上部氮素转移量和氮素转移率,从而增加了氮素籽粒生产效率,达到增产的目的。本研究还发现,增加追氮次数、适量减氮条件下,可以维持夏玉米植株地上部氮素积累量,但是显著提高了氮素农学利用效率和氮肥偏生产力,达到了减氮稳产增产的目的。

3.3 施氮量和追氮时期对夏玉米土壤硝态氮残留量的影响

氮肥淋溶不仅会导致氮肥的浪费,还会引发环境污染,大水大肥会增加氮肥淋失,从而减少玉米

对养分的吸收利用,这与实现玉米高产高效相矛盾^[31-33]。王平等^[34]研究表明氮肥后移提高其在 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的氮素残留量。本试验表明,在滴灌水肥一体化条件下,增加施氮量和追氮次数可以增加土壤硝态氮存留;增加追氮次数可以显著提高 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层硝态氮存留,且随着年份增加有向深层土壤迁移的趋势。滴灌分次追肥处理土壤硝态氮残留峰值均出现在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中,2020 年,传统灌溉处理 CK1 土壤硝态氮残留随土层深度增加而增加,这可能是由于 2020 年玉米生育期降雨量过大导致,2021 年传统灌溉处理 CK1 土壤硝态氮残留峰值出现在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中,且从 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层开始,传统灌溉处理(CK1、CK2)深层土壤硝态氮残留显著高于滴灌分次追肥处理。因此,增加追氮时期、适量减氮可以降低氮肥淋溶风险、提高氮肥农学利用效率,实现玉米栽培的高产与高效。

4 结 论

与传统畦灌常规施肥处理相比,在水肥一体化条件下,适量减氮并增加追氮次数可以显著增加夏玉米成熟期干物质积累量、收获指数、花前干物质转运量和花后干物质同化量,增加夏玉米植株成熟期氮素积累量、氮素转移量和氮素转移率;减氮并增加追氮次数可以显著增加氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力,提高 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层硝态氮残留量、减少氮肥淋溶,从而提高了植株的氮素积累量、氮收获指数、氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力,最终增加了玉米产量。N1S3、N2S3 处理各指标显著高于其他处理,但是两处理差异并不显著,N1S3 处理较 N2S3 处理少了氮肥的投入,维持了较高的干物质积累量、氮素积累量和产量,增加了氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力,表明 N1S3 为本试验的最优处理组合。

参 考 文 献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 385-414.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook-2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 385-414.
- [2] 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. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [3] 任寒, 刘鹏, 董树亭, 等. 高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 109-115.
REN H, LIU P, DONG S T, et al. Research advancements of effect of high temperature stress on growth and development of maize[J].

Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 109-115.

[4] 张经廷, 周顺利, 王志敏, 等. ¹⁵N 同位素在华北冬小麦夏玉米氮营养来源研究中的应用[J]. 同位素, 2019, 32(4): 299-307.

ZHANG J T, ZHOU S L, WANG Z M, et al. Application of ¹⁵N isotope for the identification of nitrogen nutrition sources of winter wheat and summer maize in North China plain[J]. Journal of Isotopes, 2019, 32(4): 299-307.

[5] 李英豪. 水氮运筹对管渠自动控水灌溉夏玉米产量和水氮利用效率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.

LI Y H. Effects of irrigation and nitrogen management on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize under automatic pipe channel-control irrigation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.

[6] 曲文凯, 徐学欣, 郝天佳, 等. 施氮量对滴灌冬小麦-夏玉米周年产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1271-1282.

QU W K, XU X X, HAO T J, et al. Effects of nitrogen application rate on annual yield and N-use efficiency of winter wheat-summer maize rotation under drip irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(7): 1271-1282.

[7] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 控释尿素与普通尿素配施对春玉米产量、氮肥利用及经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 31-38.

XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, et al. Effects of different ratios of controlled-release urea and common urea on yield, nitrogen utilization and economic benefit of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 31-38.

[8] 李二珍, 靳存旺, 闫洪, 等. 氮肥分次施用比例对春玉米光合速率及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (5): 12-16.

LI E Z, JIN C W, YAN H, et al. Effect of application period and ratio of nitrogen fertilizer on photosynthetic and yield of spring maize[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (5): 12-16.

[9] 刘红恩, 李金峰, 刘世亮, 等. 施用控释 BB 肥对冬小麦产量、氮素累积和氮肥利用率的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(9): 1311-1316.

LIU H E, LI J F, LIU S L, et al. Effects of release-controlled bulk blending fertilizer on grain yield, nitrogen absorption and utilization efficiency in winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(9): 1311-1316.

[10] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694.

ZHANG F S, CUI Z L, WANG J Q, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2007, 24(6): 687-694.

[11] REN K Y, XU M G, LI R, et al. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132180.

[12] DÍEZ J A, ROMAN R, CARTAGENA M C, et al. Controlling nitrate pollution of aquifers by using different nitrogenous controlled release fertilizers in maize crop[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1994, 48(1): 49-56.

[13] 吴霞, 王培娟, 公衍铎, 等. 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 190-200.

WU X, WANG P J, GONG Y D, et al. Analysis of drought identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai Plain in year of 1961-2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 190-200.

[14] 蔡晓. 滴灌条件下水氮运筹对夏玉米生长及水氮利用的影响[D].

泰安: 山东农业大学, 2020.

CAI X. Effects of water and nitrogen management on summer maize growth and water-nitrogen utilization under drip irrigation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.

[15] 李伟. 控释掺混肥在小麦-玉米轮作体系中的应用效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.

LI W. Studies on the effect of mixed controlled-release fertilizer in winter wheat and summer maize rotation system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.

[16] 殷江璇. 玉米收获机械化影响因素分析——以山西省为例[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.

YIN J X. Analysis of influencing factors on the corn harvest mechanization——a case study in Shanxi Province [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2013.

[17] GÄRDENÄS A I, HOPMANS J W, HANSON B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 219-242.

[18] 顾桂栋, 窦超银, 胡倩, 等. 滴灌高频施肥条件下玉米适宜灌水量的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 145-152.

GU G D, DOU C Y, HU Q, et al. An experimental study on suitable irrigation amount of maize under drip irrigation and high frequency fertilization[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 145-152.

[19] 葛选良, 杨恒山, 赵培军, 等. 浅埋滴灌下分期追氮对玉米花后光合特性、氮素利用和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(19): 1-7.

GE X L, YANG H S, ZHAO P J, et al. Effects of nitrogen top-dressing by stages on yield and post-flowering photosynthetic characteristics and nitrogen utilization of maize under shallow-buried drip irrigation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(19): 1-7.

[20] LU J S, HU T T, ZHANG B C, et al. Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247: 106739.

[21] 唐文雪, 马忠明, 王景才. 施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 58-63.

TANG W X, MA Z M, WANG J C. Effects of nitrogen rate on soil nitrate-N, yield and nitrogen use efficiency of double-ridge furrow sowing with full plastic film mulching for maize in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 58-63.

[22] DORDAS C. Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar, and source - sink relations[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 37(1): 31-42.

[23] 徐学欣. 冬小麦节水高产灌溉模式的源—库性能及其协调机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

XU X X. Performance and coordination of source and sink system in winter wheat underwater-saving and high-yielding irrigation patterns [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.

[24] 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 close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids[J]. Scientia Agricultura

(上接第 104 页)

- [29] 史洪洲, 汪扬媚, 胡庭兴, 等. 核桃凋落叶分解对小麦生长的影响及施氮的缓解效应[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 818-825.
- SHI H Z, WANG Y M, HU T X, et al. Effects of decomposing walnut leaf litter on growth of wheat and counteracting effect of N fertilization[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(5): 818-825.
- [30] 石军, 胡容平, 林立金, 等. 土施富集植物秸秆对牛膝菊光合生理的影响[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(8): 1-3, 8.
- SHI J, HU R P, LIN L J, et al. Effect of enriched plant straw on photosynthetic physiology of chrysanthemum[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(8): 1-3, 8.
- [31] 王佳旭, 朱凯, 张志鹏, 等. 高粱花生间作对不同单行作物根系性状及土壤微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 51-59.
- WANG J X, ZHU K, ZHANG Z P, et al. Effects of sorghum-peanut intercropping on root traits and soil microorganisms of single-row crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4): 51-59.
- [32] RICE E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1974: 208-213.
- [33] LEÃO P N, PEREIRA A R, LIU W T, et al. Synergistic allelochemicals from a freshwater cyanobacterium[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(25): 11183-11188.
- [34] 周芳, 曹国璠, 李金玲, 等. 药用植物连作障碍机制及其缓解措施研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(3): 67-72.
- ZHOU F, CAO G F, LI J L, et al. Advances in the mechanism of continuous cropping disorders of Chinese medicinal plants and the mitigation measures[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2019, 38(3): 67-72.
- [35] 李琳琳, 刘建国, 燕鹏, 等. 不同外源酚酸化感物质组合对棉花种子萌发和幼苗生长的化感效应[J]. 生态科学, 2019, 38(6): 115-119.
- LI L L, LIU J G, YAN P, et al. Allelopathic effects of different combinations of phenolic acid allelochemicals on cotton seed germination and seedling growth[J]. Ecological Science, 2019, 38(6): 115-119.
- [36] 李增亮, 任晶, 梁鑫宇, 等. 七种植物秸秆对连作番茄苗生长及土壤酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2019(20): 17-24.
- LI Z L, REN J, LIANG X Y, et al. Effect of seven plant straws on the growth of continuous cropping tomato and the activity of soil enzyme[J]. Northern Horticulture, 2019(20): 17-24.
- [37] 郭家鑫, 鲁晓宇, 陶一凡, 等. 盐碱胁迫对棉花生长和养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 23-32, 59.
- GUO J X, LU X Y, TAO Y F, et al. Effects of saline and alkaline stresses on growth and nutrient uptake of cotton[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4): 23-32, 59.