



滴灌水肥一体化下施氮量和追氮时期对夏玉米籽粒品质及淀粉糊化特性的影响

刘 帅,徐学欣,孟繁港,徐宇凡,郝天佳,贾 靖,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 为探究黄淮海平原东部地区滴灌水肥一体化条件下,不同施氮量及追氮时期组合对夏玉米籽粒品质、淀粉糊化特性和产量的影响,选用玉米主推品种‘郑单 958’为试验材料,设置施氮量 180 kg/hm² (N1)和 210 kg/hm² (N2)两个氮肥处理水平及拔节期+大喇叭口期(W1)、拔节期+开花期(W2)、拔节期+大喇叭口期+开花期(W3)3个不同追肥时期组合。结果表明:拔节期+大喇叭口期+开花期追肥处理(N1W3、N2W3)籽粒淀粉含量、粗蛋白含量、可溶性糖含量和产量显著高于其他处理,籽粒粗脂肪含量显著低于其他处理。相关性分析表明:籽粒支链淀粉含量与峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度、回复值、粗蛋白含量、可溶性糖含量呈显著正相关,与糊化温度、峰值时间、粗脂肪含量呈显著负相关。增加追氮频次改善籽粒直链淀粉与支链淀粉的比例和淀粉的糊化特性,提高了籽粒品质。N1W3与N2W3相比,籽粒品质与淀粉糊化特性差异不显著,但是N1W3处理减少氮肥的投入,节约投入成本,为本试验的推荐处理。

关键词 滴灌水肥一体化;夏玉米;施氮量;追氮时期;籽粒;品质;糊化特性;产量

玉米已连续多年作为中国第一大粮食作物,约占粮食种植总面积的35%,其产量接近全年粮食总产量的40%,在中国农业生产、食品、饲料加工中占有十分重要地位^[1-2]。氮肥对夏玉米籽粒品质有着显著的影响,适量增加施氮量能够显著增加玉米籽粒的粗蛋白含量和产量^[3],但是关于氮肥对玉米籽粒淀粉含量的作用存在不同观点,有研究表明氮肥对玉米籽粒淀粉含量作用不显著^[4],也有研究表明在一定范围内,增加氮肥施用量能够显著增加玉米籽粒的淀粉含量^[5-6]。不少学者研究认为在一定范围内增加施氮量能够提高玉米籽粒可溶性糖含量,降低粗脂肪含量,但是过量施氮不但不会提高玉米籽粒的品质,还会造成玉米贪青晚熟,造成资源浪费^[6-8]。淀粉糊化特性决定玉米籽粒淀粉的应用品质,对玉米淀粉加工利用非常重要^[9]。有研究表明玉米籽粒淀粉糊化特性与淀粉含量相关^[10],在一定范围内增加氮肥使用可以改善玉米籽粒淀粉糊化特性,改善品质^[5,11]。为此,品质改善已成为玉米研究的一项

重要内容。

黄淮海地区是中国重要的玉米种植区,该地区全年降雨分布不均,要保证玉米籽粒品质仍需一定灌溉^[12],分次追肥能够显著改善玉米籽粒品质,但是与该地区劳动力紧张问题冲突^[13]。目前,为提高产量,过度施用氮肥在农业生产中已经非常普遍,黄淮海地区夏玉米田平均施氮量已接近300 kg/hm²,但其氮肥利用率仅为16%~40%,这导致了资源的浪费,造成了环境污染^[14-16]。滴灌水肥一体化技术能够将水分和养分直接输送至作物根区,是提高养分和水分利用效率,减少资源浪费的有效方法^[17]。玉米作物对肥料需求量大,目前传统的施肥方式费时、费工、低效、污染,因此,寻求适于该地区夏玉米高产优质高效的合理施肥技术与方法具有重要的意义。

前人研究主要侧重于黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作区传统的施氮方式对夏玉米籽粒品质的影响,但是在滴灌追肥条件下,施氮量和追氮时期组合对夏玉米籽粒品质及淀粉糊化特性的研究鲜

收稿日期:2022-09-13 修回日期:2023-04-20

基金项目:山东省重大科技创新工程(2019JZZY010716);山东省新旧动能转换重大产业攻关(2021-54);国家重点研发计划(2018YFD0300604)。

第一作者:刘 帅,男,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,男,教授,研究方向为作物节水高产栽培生理生态。E-mail:zhaochangxing@126.com

见报道。本试验基于滴灌水肥一体化技术条件下,采用田间试验,设置两个氮肥梯度、3个不同追肥时期,系统探究不同施氮量和施氮时期组合对夏玉米籽粒品质的影响,以期为黄淮海平原东部夏玉米生产区滴灌水肥一体化高效调控与应用技术提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2020年6月至2021年10月两个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,该地属半湿润季风气候,土壤类型为砂姜黑土。2020年土壤基本理化性质为:有机质17.0 g/kg,土壤pH 7.7,碱解氮122.5 mg/kg,速效磷17.05 mg/kg,速效钾134 mg/kg;2021年土壤基本理化性质为:有机质16.7 g/kg,土壤pH 7.6,碱解氮117.3 mg/kg,速效磷16.7 mg/kg,速效钾133 mg/kg。2020年玉米全生育期降雨量为638.2 mm(丰水年),2021年玉米全生育期降雨量为387.8 mm(平水年),2020年和2021年玉米生育期降雨量分布见图1。

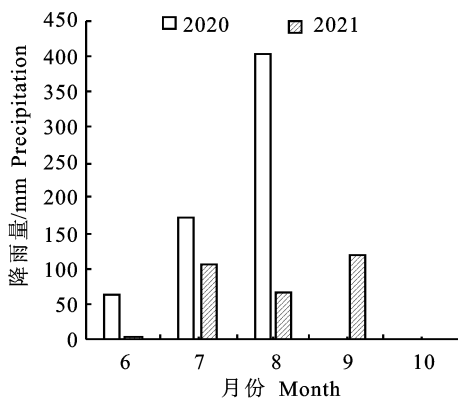


图1 2020年和2021年夏玉米全生育期降雨量分布

Fig. 1 Rainfall distribution during growth period of summer maize in 2020 and 2021

1.2 试验设计

选用夏玉米品种‘郑单958’为试验材料,试验氮肥处理设置180 kg/hm²(N1)、210 kg/hm²(N2)两个水平;追肥时期设置拔节期+大喇叭口期(W1)、拔节期+开花期(W2)和拔节期+大喇叭口期+开花期(W3)3个不同时期组合;设置施氮量240 kg/hm²,传统畦灌为对照处理CK1、CK2,CK1处理在拔节期一次性追施氮肥,CK2

在拔节期和大喇叭口期追施氮肥,共计8个处理,具体设计见表1。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/hm²,滴灌带一管一行铺设。试验田采用复合肥(N:P:K=15:15:15)底施纯氮、K₂O和P₂O₅各90 kg/hm²,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。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	底施氮量/ (kg/hm ²) Basic fertilizer rate	追施氮量/(kg/hm ²) Topdressing rate		
		拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Belling stage	开花期 Flowering stage
N1W1	90	45	45	0
N1W2	90	45	0	45
N1W3	90	30	30	30
N2W1	90	60	60	0
N2W2	90	60	0	60
N2W3	90	40	40	40
CK1	90	150	0	0
CK2	90	75	75	0

1.3 测定项目及方法

1.3.1 籽粒品质测定 玉米粉的制备:将筛选除杂好的玉米籽粒放入小型高速粉碎机(RT02B型)中,磨碎后过100目筛得玉米粉。淀粉含量及其组成的测定:参照北京索莱宝科技有限公司直链淀粉、支链淀粉测定试剂盒中的相关方法,采用可见分光光度法^[18]测定玉米籽粒中直链淀粉和支链淀粉含量,总淀粉含量=直链淀粉含量+支链淀粉含量。粗蛋白含量的测定:参照何照范^[18]方法,采用凯氏定氮法测定粗蛋白含量,粗蛋白含量=籽粒全氮含量×6.25。可溶性糖含量的测定:参照刘新等^[19]的方法,采用蒽酮-硫酸比色法测定玉米籽粒可溶性糖含量。粗脂肪含量的测定:参照朱新产等^[20]的方法,采用索氏提取法测定玉米籽粒粗脂肪含量。

1.3.2 籽粒淀粉糊化特性的测定 取成熟期籽粒50℃烘干磨碎,过100目筛,称取3 g玉米面粉(根据样品的实际水分,按14%水分校正以确定样品用量),放入快速黏度分析仪(RVA-TM型)的铝盒中,再加入25 mL的蒸馏水,用搅拌器搅拌均匀,旋入仪器进行测定。采用Std 1升温

程序测定,开始 10 s 内搅拌器转速为 960 r/min,之后保持 160 r/min;铝盒内温度开始时为 50 ℃,在 3.7 min 内上升至 95 ℃,并保持 2.5 min,然后在 3.8 min 内下降至 50 ℃,在 13 min 结束程序。

1.3.3 籽粒产量及其构成要素测定 于玉米成熟期采用人工收获的方式,每个重复选取 5 m 均匀的玉米 3 行(9 m²)果穗,每个处理重复 3 次,自然干燥用于室内考种,主要测定穗数、穗行数、行粒数、百粒质量,产量按照籽粒 14 % 含水量计算。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行计算,用 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 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米籽粒品质的影响

由表 2 可知,追氮频次对夏玉米籽粒品质有显著影响。增加追氮频次可以显著增加玉米籽粒支链淀粉、总淀粉、粗蛋白、可溶性糖含量,改善玉米籽粒直链淀粉/支链淀粉,降低籽粒粗脂肪含

量,提高籽粒品质。在滴灌相同追氮时期条件下,两种氮肥梯度差异并不显著,两年规律一致。2020 年,N1W3、N2W3 处理籽粒总淀粉含量、粗蛋白含量、可溶性糖含量较 CK1 处理分别增加 6.42%、6.88%、25.07%、24.79%、20.00%、19.55%,N1W3、N2W3 处理粗脂肪含量、直链淀粉/支链淀粉较 CK1 处理均降低 12.76% 和 27.78%;2021 年,N1W3、N2W3 处理籽粒总淀粉含量、粗蛋白含量、可溶性糖含量较 CK1 处理分别增加 6.34%、6.43%、15.49%、11.28%、19.67%、20.15%,N1W1、N2W2 处理粗脂肪含量、直链淀粉/支链淀粉较 CK1 处理分别降低 14.74%、14.94% 和 20.41%、20.41%。表明增加追氮频次可以满足玉米不同生育期对氮肥的需求,维持籽粒较高地合成淀粉和蛋白质,改善了籽粒淀粉构成因素,从而改善夏玉米籽粒品质;增加追氮频次还能减少氮肥的投入,避免大水大肥,实现玉米高效生产。

2.2 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米籽粒淀粉糊化特性的影响

如表 3 所示,在拔节期、大喇叭口期和开花期追施氮肥可以显著增加玉米籽粒淀粉的峰值黏

表 2 不同施氮时期和施氮量组合夏玉米籽粒品质(x±s)

Table 2 Grain quality of summer maize in different nitrogen application periods and nitrogen application rates

年份 Year	处理 Treatment	直链淀粉/% Amylose	支链淀粉/% Amylopectin	总淀粉/% Total starch	直链淀粉/支链淀粉 Amylose to amylopectin ratio	粗蛋白/% Crude protein	可溶性糖/% Soluble suger	粗脂肪/% Crude fat
2020	N1W1	22.11±0.32 bc	47.64±0.91 c	69.91±0.67 b	0.46±0.01 bc	10.77±0.09 d	11.69±0.11 d	4.43±0.02 b
	N1W2	22.63±0.38 b	47.01±0.69 c	69.58±0.33 b	0.48±0.02 b	11.53±0.12 c	12.26±0.11 c	4.47±0.02 b
	N1W3	20.79±0.52 d	52.40±0.94 ab	73.61±1.13 a	0.39±0.01 e	13.12±0.66 a	13.44±0.23 a	4.17±0.05 d
	N2W1	21.75±0.43 c	47.29±0.62 c	69.31±0.48 bc	0.46±0.01 c	10.84±0.01 d	11.68±0.14 d	4.44±0.15 b
	N2W2	21.63±0.10 c	46.71±0.48 c	68.64±0.56 c	0.46±0.00 bc	11.54±0.29 c	12.21±0.14 c	4.45±0.03 b
	N2W3	20.87±0.34 d	53.06±0.42 a	73.93±0.60 a	0.39±0.01 e	13.09±0.18 a	13.39±0.17 a	4.17±0.02 d
	CK1	23.90±0.27 a	44.24±0.60 d	69.17±0.87 c	0.54±0.00 a	10.49±0.03 d	11.20±0.14 e	4.78±0.04 a
	CK2	21.88±0.30 c	51.28±0.75 b	72.80±0.59 a	0.42±0.01 d	12.27±0.47 b	12.87±0.16 b	4.33±0.02 c
2021	N1W1	20.37±0.36 bc	45.34±0.64 c	65.71±0.42 bc	0.43±0.01 bc	14.02±0.37 c	10.97±0.13 c	4.48±0.06 b
	N1W2	20.02±0.18 bc	45.53±0.61 c	65.55±0.55 bc	0.43±0.01 c	14.21±0.11 c	11.08±0.20 c	4.48±0.06 b
	N1W3	19.03±0.17 d	48.39±0.71 a	67.43±0.88 a	0.39±0.00 e	15.66±0.26 a	12.41±0.04 a	4.28±0.02 c
	N2W1	20.48±0.34 b	44.57±0.44 c	65.05±0.77 c	0.46±0.00 b	14.31±0.46 c	11.25±0.11 c	4.46±0.02 b
	N2W2	20.22±0.42 bc	44.80±0.77 c	65.03±1.13 c	0.45±0.01 bc	12.30±0.22 c	11.27±0.23 c	4.47±0.05 b
	N2W3	18.96±0.19 d	48.53±0.75 a	67.49±0.61 a	0.39±0.01 e	15.09±0.14 b	12.46±0.12 a	4.27±0.04 c
	CK1	21.14±0.29 a	42.27±0.89 d	63.41±1.07 d	0.49±0.01 a	13.56±0.08 d	10.37±0.17 d	5.02±0.06 a
	CK2	19.83±0.31 c	46.68±0.15 b	66.51±0.45 ab	0.41±0.01 d	14.93±0.29 b	11.68±0.15 b	4.33±0.02 c

注:同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters after data within the same columns indicate significant difference at 5% level.

度、谷值黏度、崩解值、最终黏度、回复值,显著降低糊化温度和峰值时间,两年变化趋势相同。说明分次追施氮肥能够增加玉米籽粒淀粉的峰值黏度,增加淀粉的粘滞性;增加玉米籽粒淀粉的崩解

值和回复值,使籽粒淀粉在高温和室温下更加稳定;降低糊化温度,加快达到峰值黏度所需时间,使玉米淀粉更容易糊化,改善了玉米籽粒淀粉糊化性质。

表 3 不同施氮时期和施氮量组合夏玉米籽粒淀粉糊化特性($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Starch pasting properties of summer maize in different nitrogen application periods and nitrogen application rates

年份 Year	处理 Treatment	峰值黏度/RVU Peak viscosity	谷值黏度/RVU Trough viscosity	崩解值/RVU Break down	最终黏度/RVU Final viscosity	回复值/ RVU Setback	峰值时间/ min Peak time	糊化温度/℃ Pasting temperature
2020	N1W1	1 650.33±14.57 c	973.67±11.68 c	676.66±23.25 b	2 493.67±9.29 d	1 520.11±19.97 d	4.45±0.04 b	77.45±0.10 b
	N1W2	1 657.33±22.30 c	974.33±2.31 c	683.00±20.88 b	2 501.37±19.22 d	1 527.44±21.07 cd	4.45±0.02 b	77.13±0.25 b
	N1W3	1 740.33±18.72 a	1 011.70±12.50 a	728.66±8.08 a	2 714.37±6.51 a	1 702.67±19.01 a	4.27±0.03 cd	74.88±0.03 d
	N2W1	1 676.33±16.86 bc	980.84±7.81 bc	696.33±9.29 bc	2 549.67±20.43 c	1 569.67±18.50 bc	4.45±0.01 b	76.98±0.10 b
	N2W2	1 645.00±37.51 c	965.67±10.07 c	679.33±27.57 b	2 561.67±21.50 bc	1 596.00±17.35 b	4.55±0.07 b	76.90±0.35 b
	N2W3	1 736.33±14.05 a	1 007.00±18.03 a	729.33±4.73 a	2 697.67±21.78 a	1 690.67±34.78 a	4.26±0.05 d	74.93±0.20 d
	CK1	1 500.33±12.66 d	937.00±4.36 d	563.33±9.87 c	2 342.67±43.56 e	1 405.67±43.11 e	4.83±0.04 a	78.30±0.83 a
	CK2	1 705.66±13.05 ab	1 000.33±6.81 ab	705.33±7.23 a	2 601.67±18.45 b	1 601.37±24.58 b	4.35±0.03 c	76.16±0.20 c
2021	N1W1	1 503.37±15.53 c	898.00±8.66 c	605.37±24.01 c	2 216.33±17.62 d	1 318.33±10.26 d	4.34±0.05 b	77.85±0.05 b
	N1W2	1 498.37±13.20 c	892.37±8.74 c	606.00±16.64 b	2 218.33±4.04 cd	1 326.00±12.77 cd	4.38±0.02 b	77.85±0.23 b
	N1W3	1 652.37±20.13 a	941.11±9.00 a	711.37±16.44 a	2 340.00±8.00 a	1 399.00±17.00 a	3.96±0.04 e	75.53±0.49 d
	N2W1	1 509.37±17.10 c	907.00±7.21 c	602.37±20.60 c	2 245.66±16.50 c	1 338.66±11.06 c	4.21±0.07 c	77.88±0.06 b
	N2W2	1 517.37±9.07 c	896.67±8.14 c	620.67±13.61 c	2 231.33±15.50 cd	1 334.66±20.60 cd	4.20±0.06 c	77.87±0.10 b
	N2W3	1 651.67±9.07 a	942.00±9.17 a	709.67±1.53 a	2 359.33±17.90 a	1 417.33±11.93 a	3.95±0.04 e	75.87±0.10 d
	CK1	1 405.00±10.54 d	842.67±4.93 d	562.37±11.72 d	2 147.66±16.04 e	1 305.00±11.53 d	4.47±0.05 a	78.95±0.13 a
	CK2	1 601.37±10.69 b	919.37±7.09 b	682.00±12.12 a	2 302.33±23.46 b	1 383.00±30.20 b	4.07±0.04 d	76.63±0.13 c

2.3 相关性分析

相关性分析(表 4 和表 5)表明:玉米籽粒中直链淀粉含量与峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度、回复值、粗蛋白含量、可溶性糖含量成显著负相关,与糊化温度、峰值时间、粗脂肪含量成显著正相关;支链淀粉含量与峰值黏度、谷值黏

度、崩解值、最终黏度、回复值、粗蛋白含量、可溶性糖含量成显著正相关,与糊化温度、峰值时间、粗脂肪含量成显著负相关,两年规律一致。说明玉米籽粒中支链淀粉含量越高,玉米籽粒淀粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和回复值就越高,糊化温度越低,峰值时间越短。

表 4 2020 年玉米籽粒淀粉糊化特性与籽粒品质之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between starchpasting properties and grain quality of maize kernels in 2020

指标 Indicator	峰值黏度 Peak viscosity	谷值黏度 Trough viscosity	崩解值 Break down	最终黏度 Final viscosity	回复值 Setback	糊化温度 Pasting temperature	峰值时间 Peak time	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	粗蛋白 Crude protein	可溶性糖 Soluble suger
谷值黏度 Trough viscosity	0.962**										
崩解值 Break down	0.993**	0.926**									
最终黏度 Final viscosity	0.944**	0.949**	0.927**								
回复值 Setback	0.924**	0.920**	0.912**	0.997**							
糊化温度 Pasting temperature	-0.811**	-0.937**	-0.841**	-0.973**	-0.966**						
峰值时间 Peak time	-0.989**	-0.924**	-0.995**	-0.928**	-0.913**	0.846**					
直链淀粉 Amylose	-0.921**	-0.876**	-0.931**	-0.961**	-0.967**	0.882**	0.924**				
支链淀粉 Amylopectin	0.881**	0.965**	0.829*	0.925**	0.900**	-0.958**	-0.841**	-0.821*			
粗蛋白 Crude protein	0.799*	0.875**	0.746*	0.906**	0.899**	-0.965**	-0.771*	-0.766*	0.928**		
可溶性糖 Soluble suger	0.846**	0.907**	0.799*	0.925**	0.915**	-0.966**	-0.824*	-0.796*	0.942**	0.995**	
粗脂肪 Crude fat	-0.972**	-0.973**	-0.953**	-0.980**	-0.965**	0.949**	0.957**	0.946**	-0.944**	-0.877**	-0.908**

注: ** 和 * 分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平上相关性显著。下同。

Note: ** and * indicate significant correlations at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels. The same below.

表5 2021年玉米籽粒淀粉糊化特性与籽粒品质之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between starchpasting properties and grain quality of maize kernels in 2021

指标 Indicator	峰值黏度 Peak viscosity	谷值黏度 Trough viscosity	崩解值 Break down	最终黏度 Final viscosity	回复值 Setback	糊化温度 Pasting temperature	峰值时间 Peak time	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	粗蛋白 Crude protein	可溶性糖 Soluble sugar
谷值黏度 Trough viscosity	0.965**										
崩解值 Break down	0.989**	0.915**									
最终黏度 Final viscosity	0.992**	0.965**	0.976**								
回复值 Setback	0.965**	0.891**	0.976**	0.979**							
糊化温度 Pasting temperature	-0.989**	-0.936**	-0.988**	-0.976**	-0.961**						
峰值时间 Peak time	-0.965**	-0.928**	-0.957**	-0.975**	-0.964**	0.943**					
直链淀粉 Amylose	-0.961**	-0.925**	-0.951**	-0.949**	-0.922**	0.967**	0.887**				
支链淀粉 Amylopectin	0.974**	0.953**	0.956**	0.958**	0.916**	-0.974**	-0.888**	-0.986**			
粗蛋白 Crude protein	0.966**	0.919**	0.963**	0.950**	0.929**	-0.978**	-0.943**	-0.929**	0.928**		
可溶性糖 Soluble sugar	0.984**	0.953**	0.971**	0.988**	0.968**	-0.980**	-0.968**	-0.970**	0.960**	0.961**	
粗脂肪 Crude fat	-0.884**	-0.959**	-0.813**	-0.871**	-0.761**	0.830**	0.820**	0.851**	-0.893**	-0.820**	-0.850**

2.4 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米籽粒产量及其构成因素的影响

夏玉米籽粒产量及其构成因素如表6所示,在相同施氮量下,增加追氮时期能够提高夏玉米籽粒穗行数、行粒数、百粒质量和产量。进一步分析表明:N1W3、N2W3处理穗行数、行粒数高于其他处理,但二者差异不显著;增加追氮时期能够

显著提高玉米籽粒百粒质量和产量,N1W3、N2W3处理籽粒百粒质量和产量最高且显著高于其他处理,表明增加追氮时期可以维持较高的玉米籽粒百粒质量,达到节约氮肥的目的,增加追氮时期能够增加籽粒的穗行数和行粒数,进而增加产量。

表6 不同施氮时期和施氮量组合夏玉米产量及其构成因素

Table 6 Yield and its constituent factors of summer maize in different nitrogen application periods and nitrogen application rates

年份 Year	处理 Treatment	穗数/(hm ⁻²) Ear number	穗行数 Kernel row number	行粒数 Kernel number per row	百粒质量/g Mass of 100-kernels	产量/ (kg/hm ²) Yield
2020	N1W1	73 335 a	14.80 c	29.25 c	31.20 e	8 342.10 e
	N1W2	73 335 a	14.77 c	29.95 b	31.47 d	8 536.11 cd
	N1W3	73 710 a	15.10 a	30.32 ab	32.27 a	9 291.00 a
	N2W1	71 850 a	14.87 bc	29.77 bc	31.59 cd	8 438.15 de
	N2W2	72 225 a	14.87 bc	30.16 b	31.82 b	8 667.48 b
	N2W3	73 335 a	15.07 ab	30.73 a	32.41 a	9 387.41 a
	CK1	74 445 a	14.17 d	29.26 c	31.05 e	7 970.90 f
	CK2	72 225 a	14.90 abc	30.18 b	31.71 bc	8 620.02 bc
2021	N1W1	73 335 a	14.97 c	35.24 cd	28.58 d	9 325.93 d
	N1W2	72 600 a	14.93 c	35.30 cd	28.52 d	9 311.11 d
	N1W3	72 600 a	15.13 ab	35.78 a	30.02 a	10 055.56 a
	N2W1	72 600 a	15.00 bc	35.23 cd	28.88 c	9 418.52 c
	N2W2	72 225 a	15.03 bc	35.29 cd	28.66 d	9 340.74 d
	N2W3	72 960 a	15.20 a	35.64 ab	30.01 a	10 074.07 a
	CK1	72 960 a	14.53 d	35.03 d	28.15 e	8 896.30 e
	CK2	73 710 a	14.97 c	35.42 bc	29.41 b	9 725.93 b

注:同列数据后不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters after data within the same columns indicate significant difference at 5% level.

3 讨论

3.1 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米籽粒品质的影响

氮肥对玉米籽粒品质有显著影响,前人研究表明玉米籽粒粗蛋白含量随施氮量的增加而增加^[21],吴元奇等^[1]研究表明适量减氮缓控释氮肥可以增加玉米籽粒粗蛋白的含量,达到节约氮肥的目的,但施氮量对玉米籽粒淀粉和脂肪含量结果存在争议^[3,6,22-24]。这可能是氮素影响植株内化合物的合成有关,减少施氮量导致植株体内碳氮代谢减弱,蛋白质合成途径受阻,降低蛋白质的含量^[25],蔗糖是合成籽粒蛋白质和淀粉的原料,蛋白质合成受阻会减少蔗糖的消耗,从而增加籽粒淀粉的含量^[23],而过量施氮并不利于增加玉米籽粒蔗糖和淀粉含量,反而增加粗脂肪含量^[26]。本研究发现:在滴灌条件下,适量减氮增加追氮频次可以满足玉米对氮素的需求,提高籽粒粗蛋白、淀粉和可溶性糖含量,优化直链淀粉和支链淀粉的比例,降低直/支和粗脂肪含量,达到节水节肥改善品质的目的,但减少追氮频次籽粒品质略有下降,这支持了前人研究的观点。

3.2 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米籽粒淀粉糊化特性的影响

糊化特性影响着玉米籽粒的稳定性和加工的方向,前人研究表明玉米籽粒淀粉糊化特性受氮肥调控影响,玉米籽粒淀粉糊化特性与淀粉粒大小有关,追氮和补灌可以增加大淀粉粒所占体积,籽粒支链淀粉和总淀粉含量越多^[5,27]。本研究表明增加追氮频次可以增加玉米籽粒支链淀粉和总淀粉含量,改善玉米籽粒淀粉的糊化特性,降低糊化温度,缩短糊化时间;滴灌条件下,两次追肥处理籽粒淀粉的糊化特性差异并不显著。N1W3、N2W3处理与CK1相比,玉米籽粒淀粉的粘滞性增加,增加了玉米籽粒的冷热稳定性,改善了籽粒淀粉的糊化特性。

3.3 不同施氮时期和施氮量组合对夏玉米产量及其构成因素的影响

产量构成因素之间的协调发展是实现玉米高产高效的基础,前人研究表明适量增施氮肥和氮肥后移能够提高玉米产量,氮肥对作物的增产主要表现在作物的有效穗数、穗粒数和千粒质量上^[28-29]。本研究发现:在滴灌水肥一体化条件下,增加追氮时期可以显著提高玉米籽粒的穗行数和

行粒数,提高籽粒百粒质量,这与前人研究规律一致。本研究还发现:在滴灌水肥一体化条件下,适量减氮、增加追氮时期可以维持较高的穗行数、行粒数和百粒质量,满足玉米不同生育期对氮肥的需求,达到节约氮肥、稳产增产的目的。

4 结论

与传统畦灌常规施肥处理相比,在滴灌水肥一体化条件下,拔节期、大喇叭口期、开花期分次追施氮肥处理(N1W3、N2W3)通过增加追肥频次,提高了籽粒淀粉、粗蛋白、可溶性糖含量,降低籽粒粗脂肪含量,改善籽粒直/支和淀粉的糊化特性,降低籽粒淀粉的糊化温度和峰值时间,使玉米粉更容易糊化。相关性分析表明:玉米总淀粉和支链淀粉含量增加,籽粒淀粉更容易糊化且更加稳定。增加追氮频次可以显著提高玉米籽粒的穗行数和行粒数,维持籽粒较高的百粒质量,从而增加玉米籽粒产量。N1W3与N2W3相比各指标差异并不显著,但N1W3减少了氮肥的投入,维持了较高的籽粒品质与产量,本研究结果为黄淮海平原东部夏玉米生产区滴灌水肥一体化高效调控与应用技术提供理论依据。

参考文献 Reference:

- [1] 吴元奇,王伟,赵丽,等.施氮量与密度对西南地区主栽青贮玉米品种产量和品质的影响[J].玉米科学,2022,30(5):99-107,115.
WU Y Q, WANG W, ZHAO L, et al. Effect of nitrogen application and density on yield and quality of mainly planted maize varieties in Southwest China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(5): 99-107, 115.
- [2] 李霞沂,顾晓红,苏萍.我国玉米品种资源主要品质的鉴定与筛选[J].中国粮油学报,1996,11(6):1-3.
LI X X, GU X H, SU P. Chinese corn variety resources quality examination and screening[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 1996, 11(6): 1-3.
- [3] 刘彩彩,张孟妮,武雪萍,等.微喷水肥一体化氮肥后移对夏玉米氮素吸收及籽粒产量品质的影响[J].中国土壤与肥料,2019,284(6):108-113.
LIU C C, ZHANG M N, WU X P, et al. Effects of integrated micro-water spraying fertilizer on nitrogen uptake and grain yield and quality of summer maize[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, 284(6): 108-113.
- [4] 关义新,马兴林,凌碧莹.种植密度与施氮水平对高淀粉玉米郑单18淀粉含量的影响[J].玉米科学,2004(S2):101-103.
GUAN Y X, MA X L, LING B Y. Effects of plant population and nitrogen rate on the grain starch contents of high

- starch corn hybrid(*Zea mays* L.)Zhengdan 18[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2004(S2):101-103.
- [5] 崔丽娜,李庆方,董树亭. 追氮对夏玉米淀粉含量及其糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3):43-47.
CUI L N, LI Q F, DONG S H T. The effects of nitrogen fertilize topdressing on starch content and starch pasting properties in summer maize(*Zea mays* L.) [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(3):43-47.
- [6] 于宁宁,任佰朝,赵 斌,等. 施氮量对夏玉米籽粒灌浆特性和营养品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11):3771-3776.
YU N N, REN B ZH, ZHAO B, et al. Effects of nitrogen application rate on grain filling characteristics and nutritional quality of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11):3771-3776.
- [7] 刘海龙,何 萍,金继运,等. 施氮对高淀粉玉米和普通玉米子粒可溶性糖和淀粉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3):493-500.
LIU H L, HE P, JIN J Y, et al. Effects of nitrogen nutrition on sugar and starch accumulation of high starch maize and common maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3):493-500.
- [8] 于宁宁,赵子航,任佰朝,等. 综合农艺管理促进夏玉米氮素吸收、籽粒灌浆和品质提高[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5):797-805.
YU N N, ZHAO Z H, REN B ZH, et al. Integrated agronomic management practices improve nitrogen absorption, grain filling and nutritional qualities of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5):797-805.
- [9] 郭爱良,周湘寒,姚亚亚,等. 不同玉米品种理化特性及淀粉品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5):39-47.
GUO A L, ZHOU X H, YAO Y Y, et al. Physicochemical properties and starch quality of different corn varieties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(5):39-47.
- [10] 张旭东,郭东伟,钟雨越,等. 不同直链淀粉含量玉米粉和玉米淀粉的理化特性差异分析[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4):568-573.
ZHANG X D, GUO D W, ZHONG Y Y, et al. Differential analysis in physicochemical properties between maize flour and starch with different amylose/amylopectin ratios[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(4):568-573.
- [11] WANG J, FU P, LU W, et al. Application of moderate nitrogen levels alleviates yield loss and grain quality deterioration caused by post-silking heat stress in fresh waxy maize[J]. *The Crop Journal*, 2020, 8(6):1081-1092.
- [12] 牛萌萌,方会敏,荐世春,等. 黄淮海东部小麦玉米周年全程机械化生产现状[J]. 农业工程, 2020, 10(10):1-7.
NIU M M, FANG H M, JIAN S H CH, et al. Present situation of annual whole process mechanization of wheat and maize in east of Huanghuaihai plain[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(10):1-7.
- [13] KETTERING J, RUIDISCH M, GAVIRIA C, et al. Fate of fertilizer 15N in intensive ridge cultivation with plastic mulching under a monsoon climate[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 95(1):57-72.
- [14] GUO J J, FAN J L, ZHANG F C, et al. Blending urea and slow-release nitrogen fertilizer increases dryland maize yield and nitrogen use efficiency while mitigating ammonia volatilization[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 790:148058.
- [15] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216:225-233.
- [16] SHEN L X, HUANG Y K, LI T. Top-grain filling characteristics at an early stage of maize(*Zea mays* L.) with different nitrogen use efficiencies[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(3):626-639.
- [17] 张孟妮,毛平平,王 丽,等. 微喷水肥一体化提高冬小麦产量与品质[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4):86-92.
ZHANG M N, MAO P P, WANG L, et al. Effect of integral control of micro-sprinkling and fertilization on the population dynamics, yield and quality of winter wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4):86-92.
- [18] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术[M]. 北京:中国农业出版社, 1985:290-294.
HE ZH F. Grain Quality and Its Analysis Technology [M]. Beijing, China Agriculture Press, 1985:290-294.
- [19] 刘 新,刘洪庆. 植物生理学实验[M]. 北京:高等教育出版社, 2018:69-71.
LIU X, LIU H Q. Plant Physiology Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018:69-71.
- [20] 朱新产,高 玲. 基础生物化学实验[M]. 北京:中国农业出版社, 2016:39-40.
ZHU X CH, GAO L. Basic Biochemistry Experiments [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2016:39-40.
- [21] 王 佳,李 阳,贾倩民,等. 种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量与品质及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(1):60-73.
WANG J, LI Y, JIA Q M, et al. Effects of planting density and nitrogen application on yield, quality and water use efficiency of silage maize in hexi irrigation region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(1):60-73.
- [22] KHAN A. Maize(*Zea mays* L.) genotypes differ in phenology, seed weight and quality (protein and oil contents) when applied with variable rates and source of nitrogen [J]. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 2016, 4(1):1000164.
- [23] 杨恩琼,黄建国,何腾兵,等. 氮肥用量对普通玉米产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3):

- 509-513.
- YANG E Q, HUANG J G, HE T B, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on yield and nutritional qualities of food maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3):509-513.
- [24] 王晨光, 赵美娟, 裴文东, 等. 施氮量对粮饲兼用玉米籽粒产量和饲用品质的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6):148-153.
- WANG CH G, ZHAO M J, PEI W D, *et al.* Effects of nitrogen rates on grain yield and forage quality of dual-purpose maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(6):148-153.
- [25] 冯云超, 余志江, 霍仕平, 等. 低氮对不同类型玉米品种籽粒产量与品质的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1):381-387.
- FENG Y CH, YU ZH J, HUO SH P, *et al.* Effects of low nitrogen levels on yield and quality for the different types maize varieties[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1):381-387.
- [26] HE P, JIN J Y, ZHOU W. Effect of nitrogen application on accumulation and translocation of carbon of nitrogen compounds in two maize cultivars with different senescent appearance[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(4/5):671-681.
- [27] 石德杨, 张海艳, 董树亭. 补充灌溉和施氮对玉米籽粒淀粉粒粒度分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(4):633-643.
- SHI D Y, ZHANG H Y, DONG SH T. Effects of supplemental irrigation and nitrogen application on starch granule size distribution of maize grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4):633-643.
- [28] 魏廷邦, 胡发龙, 赵 财, 等. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(15):2916-2927.
- WEI T B, HU F L, ZHAO C, *et al.* Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing application in oasis irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15):2916-2927.
- [29] 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13):2697-2705.
- WANG L M, LI SH Q, SHAO M A. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*Zea mays* L.) leaf and straw-sheath[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13):2697-2705.

Effects of Nitrogen Fertilization Application and Topdressing Period on Grain Quality and Starch Pasting Properties of Summer Maize under Drip Irrigation

LIU Shuai, XU Xuexin, MENG Fangang, XU Yufan, HAO Tianjia,
JIA Jing, ZHANG Yulu and ZHAO Changxing

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

Abstract The effects of nitrogen fertilization application and topdressing period on grain quality and starch pasting properties of summer maize under drip irrigation were investigated. Variations in maize grain quality and pasting properties arise from differences in amino acid supply, protein synthesis capacity, and starch content resulting from different fertilization methods. In this study, multiple combination of nitrogen fertilization application and topdressing period were applied to explore the its effects on grain quality, starch pasting properties and yield of summer maize under drip irrigation with water-and-fertilizer integration in the eastern part of Huanghuaihai plain. An elite maize hybrid ‘Zhengdan 958’ was treated with two nitrogen levels of 180 kg/hm² (N1) and 210 kg/hm² (N2) at three combinations of different topdressing periods, namely, jointing stage + belling stage (W1), jointing stage + flowering stage (W2), jointing stage + belling stage + flowering stage (W3). The results showed that the kernel starch content, crude protein content, soluble sugar content and grain yield of the topdressing treatments (N1W3, N2W3) were significantly higher than those of other treatments, while the crude fat content of the grain was significantly lower than that of the other treatments. Correlation analysis showed that amylopectin content was positively correlated with peak viscosity, trough viscosity, breakdown, final viscosity, setback, crude protein content and soluble sugar content, but negatively correlated with pasting temperature, peak time and crude fat content. The ratio of amylose to amylopectin and pasting properties of starch were improved by increasing the frequency of nitrogen chasing, and grain quality was improved sequentially. Furthermore, N1W3 is recommended due to the lower cost with the reduction of nitrogen fertilizer application and comparable significant impacts on grain quality and starch gelatinization with N2W3.

Key words Water and fertilizer integration under drip irrigation; Summer corn; Nitrogen fertilization application; Topdressing period; Grain; Quality; Pasting properties; Yield

Received 2022-09-13

Returned 2023-04-20

Foundation item The Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province (No. 2019JZZY010716); the Major Industrial Project of Shandong Province: New and Old Kinetic Energy Conversion (No. 2021-54); the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0300604).

First author LIU Shuai, male, master student. Research area: high-yield and water-saving cultivation of maize. E-mail: 978829975@qq.com

Corresponding author ZHAO Changxing, male, professor. Research area: physiology and ecology of water-saving and high-yield cultivation of crops. E-mail: zhaochangxing@126.com