

增施硫肥对成熟期糯玉米产量和品质的影响

蒋晨炀, 梁毓文, 李 薇, 王玉茹, 郭 剑, 陆大雷, 李广浩

(扬州大学农学院/江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/

江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 以京科糯 2000(JKN2000)和苏玉糯 5 号(SYN5)为材料, 大田条件下设正常施肥水平(N)和正常施肥下增施硫肥(N+S)两个处理, 研究增施硫肥对成熟期糯玉米产量和品质的影响。结果表明, 增施硫肥显著提高 JKN2000 (15.0%)和 SYN5(19.1%)的子粒产量($P<0.01$)。与 N 处理相比, N+S 处理下 JKN2000 干物质、氮素和硫素积累量分别增加 9.1%、33.6%和 31.5%, SYN5 分别增加 11.7%、29.8%和 41.1%。增施硫肥处理下 JKN2000 和 SYN5 的氮收获指数分别提高 3.2%和 3.7%($P<0.05$), 氮肥偏生产力提高 14.9%和 19.4%($P<0.01$)。增施硫肥显著提高 JKN2000 淀粉的峰值黏度和崩解值, SYN5 的糊化特征值均有所降低。增施硫肥处理下 SYN5 和 JKN2000 淀粉的回生热焐值分别降低 9.2%和 30.2%($P<0.01$), 回生值降低 1.8%和 7.1%($P<0.01$)。研究表明, 适当增施硫肥不仅能提高糯玉米子粒产量和氮肥利用率, 而且能有效调优糯玉米糊化特性和热力学特性。

关键词: 糯玉米; 增施硫肥; 产量; 糊化特性; 热力学特性

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Adding Sulfur Fertilizer Application on Yield and Quality of Waxy Maize at Maturity

JIANG Chen-yang, LIANG Yu-wen, LI Wei, WANG Yu-ru, GUO Jian, LU Da-lei, LI Guang-hao

(College of Agriculture, Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/

Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Co-Innovation Center for Modern

Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In this field experiment, Jingkenuo2000(JKN2000) and Suyunuo 5(SYN5) were used as materials, and two fertilization treatments of normal fertilization level(N) and normal fertilization level with sulfur fertilizer(N+S) were set up to examine the effects of adding sulfur fertilizer on the yield and quality of waxy maize. The results showed that grain yield of JKN2000 and SYN5 increased by 15% and 19.1%($P<0.01$) under (N+S) treatment. Compared with N treatment, the dry matter accumulation, nitrogen and sulfur accumulation of JKN2000 significantly increased by 9.1%, 33.6% and 31.5% under (N+S) treatment, and increased by 11.7%, 29.8% and 41.1% in SYN5. Nitrogen harvest index of JKN2000 and SYN5 increased by 3.2% and 3.7%($P<0.05$) under (N+S) treatment, and nitrogen partial factor productivity increased by 14.9% and 19.4%($P<0.01$). Sulfur fertilizer application significantly increased the starch peak viscosity and breakdown of JKN2000, while the pasting characteristic values of SYN5 decreased. The starch retrogradation enthalpy of JKN2000 and SYN5 decreased by 9.2% and 30.2%($P<0.01$) under (N+S) treatment, and retrogradation percentage decreased by 1.8% and 7.1%($P<0.01$), respectively. The results showed that sulfur fertilizer application not only increase the grain yield and nitrogen utilization efficiency of waxy maize, but also effectively optimize the pasting and thermodynamic characteristics.

Key words: Waxy maize; Adding sulfur fertilizer; Yield; Pasting property; Thermal property

录用日期: 2024-04-18

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX[23]3117)、国家自然科学基金项目(32101828)、江苏现代农业产业技术体系项目(JATS[2023]454)、江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 蒋晨炀(2000-), 男, 江苏镇江人, 硕士, 主要从事玉米栽培生理研究。

李广浩为本文通信作者。E-mail: guanghaoli@yzu.edu.cn

玉米作为我国第一大粮食作物,是确保我国粮食稳产和增产的关键^[1]。目前,我国糯玉米种植面积约为80万 hm^2 ,已成为世界上种植糯玉米面积最大的国家^[2]。糯玉米具有黏软清香的特点,其子粒支链淀粉含量近100%^[3]。糯玉米淀粉具有高黏度、低回生、易消化的特点,使其成为食品、饲料和工业生产中的重要作物^[4]。因地制宜发展特用玉米、糯玉米对促进农业种植业结构调整和增加农民收入具有重要作用。

合理施肥是提高作物产量、品质和保护生态环境的关键,肥料施用过多、不足或不平衡均会导致严重的负面效应。氮和硫是植物生长发育必需的营养元素,且均为合成蛋白质和氨基酸的重要成分^[5],对玉米产量、品质及养分吸收与利用具有重要调控作用^[6]。玉米对氮肥需求量较大,由于存在氮硫互作效应,适宜的氮肥和硫肥施用量可显著促进玉米的生长发育。研究表明,当氮肥供应充足的情况下,作物对硫肥的响应会更加敏感^[7]。近几十年来,人们常常依靠大量施用氮肥来获取更高的子粒产量和蛋白质含量,忽视了硫肥对玉米产量和品质的提升作用。由于环境保护措施的实施及大气中 SO_2 排放量的减少,存在硫肥用量不合理和不平衡现象,造成肥料利用率偏低及一系列环境问题,致使土壤和作物硫素缺乏的现象逐渐显现^[8]。施硫可以提高玉米产量^[9]、地上部干物质积累量及植株氮、硫素含量^[10],过量施硫会导致植株硫含量下降,降低肥料利用率^[11]。适量的氮肥施用可以提高春玉米的氮肥利用效率及产量^[12],过量施氮肥会降低干物质积累及氮肥利用率^[13]。合理施氮肥可以提高糯玉米的峰值黏

度、谷值黏度、崩解值和终值黏度,糊化温度适中^[14],降低淀粉的回生值和回生淀粉的热焓值^[15];施氮不合理会使糯玉米的峰值黏度和崩解值下降,糊化温度升高,热焓值和回生热焓值升高^[16],从而降低糯玉米的品质。氮和硫在作物植株中的吸收、同化及生理功能类似,其中任何一种养分的缺乏都会抑制作物对另一种元素的吸收。合理的氮、硫配施有利于玉米生长及氮、硫素的吸收^[17],可以减少氮肥损失,提高氮肥利用率,协同提高子粒产量^[18]。前人关于硫肥对作物影响的研究主要集中在产量及肥料利用效率方面^[19-20],对糯玉米子粒品质的影响少有报道。本研究在合理施肥的基础上,研究增施硫肥对成熟期糯玉米产量和品质的影响,为糯玉米合理施肥和品质调优提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于2022年春季在江苏省扬州大学农学院试验田进行,试验地土壤为沙壤土,耕作层0~20 cm播种前土壤养分含量:有机质16.8 g/kg,全氮1.02 g/kg,速效氮85.3 mg/kg,速效磷6.3 mg/kg,速效钾53.7 mg/kg,全硫293.9 mg/kg。供试品种选用苏玉糯5号(SYN5)和京科糯2000(JKN2000),SYN5是我国南方糯玉米区域试验对照品种,JKN2000是我国目前种植区域最广的糯玉米品种。

供试肥料包括绿聚能复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=27:9:9$),产自中东化肥公司;老虎硫(含S量90%),产自美国H.J.Baker公司。试验设置常规施肥方式(N)和常规施肥方式下增施硫肥(N+S)两个处理,常规施肥

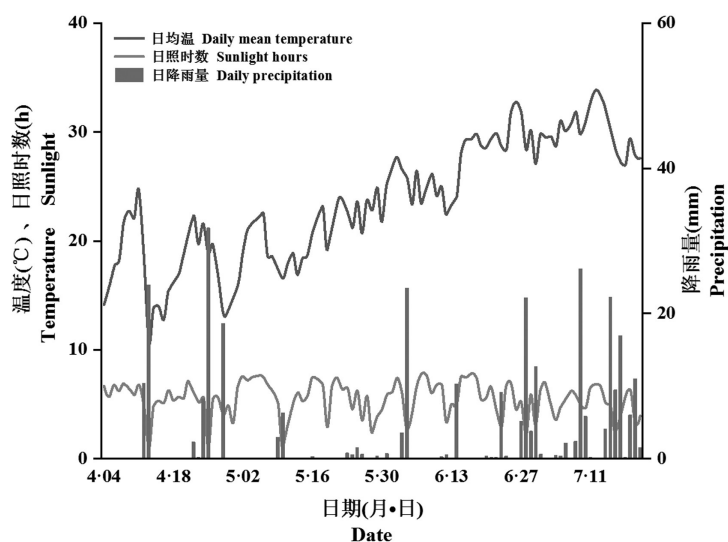


图1 玉米生育期内气温、降雨量和日照时数

Fig.1 Temperature, precipitation and sunlight hours during the growth period of maize

方式下肥料施用量为N:P₂O₅:K₂O=225:75:75 kg/hm²,增施硫肥处理施肥量为N:P₂O₅:K₂O:S=225:75:75:75 kg/hm²,所有肥料均在播种时一次性基施,每个处理3次重复,每个小区种植面积为24 m²(6.0 m×4.0 m),大小行(大行80 cm、小行40 cm)种植,播种密度为60 000株/hm²。两个品种均在4月4日播种,7月21日收获,生育期共计108 d。大田试验气象条件,全生育期内有效积温、总降水量和总日照时数分别为1 484.5 ℃·d、312.3 mm和593.9 h。

1.2 测定项目与方法

玉米生理成熟期进行采收,每个处理选取3个样点,每个样点采用连续取样法分别取10个代表性果穗,计算每个处理30个果穗平均重,根据平均穗重选出10个长势均匀的果穗进行考种测定穗粒数、千粒重,计算标准含水率(14%)下的子粒产量。

在生理成熟期各处理分别取长势均匀一致有代表性的3株植株地上部分,按不同器官分为茎秆、叶片、苞叶、穗轴、子粒5个部分,80 ℃恒温烘干至恒重后称重,然后按部位粉碎样品,以备测氮、硫含量。

称取0.5 g过筛后的粉样,用CuSO₄和K₂SO₄作为催化剂,再加入13 mL的浓硫酸硝化2 h后用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec 8400, FOSS, Denmark)测定不同部位的含氮量。将0.5 g的样品称重到预先清洁的微波消化管中,并将3 mL超纯水和5 mL浓HNO₃加入到每个管中,然后在微波消化器(MARS5, CEM Corporation, America)中180 ℃下加热40 min。冷却后,将上清液合并,并用超纯水稀释至50 mL。通过电感耦合等离子体光学发射光谱仪(ICP-OES;

iCAP 6300, Thermo Scientific, America)测定不同器官的硫含量。

以成熟期糯玉米粉和淀粉为试验材料,参照文献报道^[21]的方法,用快速粘度分析仪(RVA, Model 3D, Newport Science, Warriewood NSW, Australia)测定淀粉(总重28 g;7%,w/w,干基)和糯玉米粉的糊化特性。使用差示扫描热仪(DSC, Model 200 F3 Maia, NETZSCH, Bavaria, Germany)测定热力学特性。

植株氮素积累量=样品干物质质量×烘干样品含氮量;

氮收获指数=子粒氮积累总量/植株氮积累总量×100%;

氮肥偏生产力=施氮区产量/施氮量;

氮素子粒生产效率=子粒产量/氮素积累总量。

1.3 数据处理与分析

采用SPSS 26进行统计分析和差异显著性检验,采用Excel 2016和Origin 2021进行数据、图表处理。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

JKN2000的穗粒数、千粒重、出籽率和子粒产量均显著高于SYN5($P<0.01$),产量及构成因素对增施硫肥的响应趋势一致,均呈显著增加趋势;N+S处理的穗粒数、千粒重、产量分别比N处理增加7.9%、6.5%、15.0%(JKN2000)和8.7%、9.6%、19.1%(SYN5),差异显著($P<0.01$),N+S处理提高了两个品种的收获指数(表1)。

表1 增施硫肥对成熟期糯玉米产量及其构成因素的影响
Table 1 Effects of adding sulfur fertilizer application on yield and components of waxy maize at maturity

品 种	处 理	穗行数	行粒数(粒)	穗粒数(粒)	千粒重(g)	出籽率	子粒产量	收获指数
Variety	Treatment	(行)	Grain number	Kernel number	1 000-grain	(%)	(kg/hm ²)	(%)
		Ear rows	per row	per ear	weight	Seed rate	Grain yield	Harvest index
JKN2000	N	14 a	36.8 b	514.5 b	288.0 c	84.7 b	8 890.5 b	47.8 ab
	N+S	14 a	39.7 a	555.3 a	306.7 a	85.2 a	10 220.1 a	49.2 a
SYN5	N	14 a	26.8 d	375.7 d	272.9 d	80.4 d	6 151.9 d	44.2 b
	N+S	14 a	29.2 c	408.3 c	299.0 b	82.3 c	7 325.9 c	46.9 ab
F 值	品 种	/	840.9**	17.2**	1 782.9**	5832.0**	261.7**	7.1*
	处 理	/	270.2**	100.1**	8 003.9**	612.5**	1 241.9**	3.5
	品种×处理	/	559.4**	3.3	152.9**	200.0**	2.8	0.4

注:N处理为常规施肥方式;N+S处理为常规施肥方式下增施硫肥。同列数值后不同字母表示不同品种处理间差异达到显著水平($P<0.05$);“*、**”分别表示在0.05、0.01水平上差异显著。下图、下表同。

Note: N treatment was conventional fertilization, N+S treatment was sulfur fertilizer application under conventional fertilization. Different letters after the same column value indicate that the difference between treatments of the different variety reaches a significant level($P<0.05$), * and ** indicated significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

2.2 干物质积累与分配

增施硫肥对成熟期糯玉米干物质积累与分配有显著影响(图2)。N+S处理比N处理干物质积累总量增加9.1%(JKN2000)和11.7%(SYN5),差异显著($P <$

0.01),主要是子粒干物质积累量的增加($P < 0.01$)。JKN2000的干物质积累总量高于SYN5, JKN2000和SYN5子粒干物质分配占比在N+S处理下分别增加1.3%和2.8%。

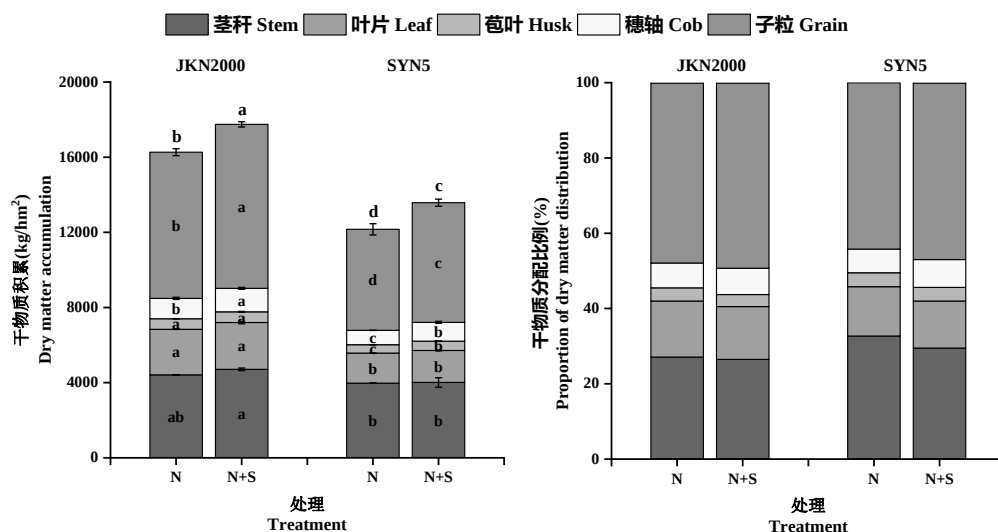


图2 增施硫肥对成熟期糯玉米干物质积累与分配的影响

Fig.2 Effects of adding sulfur fertilizer application on dry matter accumulation and distribution of waxy maize at maturity

2.3 氮素积累与分配

增施硫肥对成熟期糯玉米的氮素积累与分配有显著影响(图3)。JKN2000的氮素积累总量高于SYN5($P < 0.01$)。与N处理相比, JKN2000和SYN5的

氮素积累总量在N+S处理下分别提高33.6%和29.8%($P < 0.01$)。N+S处理下两个品种子粒氮素分配占比分别增加3.2%和3.7%。

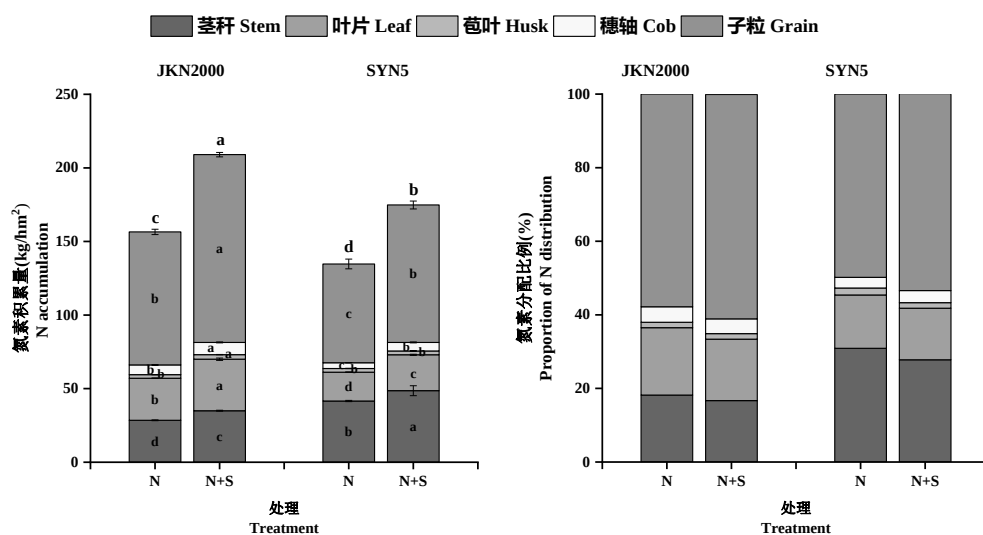


图3 增施硫肥对成熟期糯玉米氮素积累与分配的影响

Fig.3 Effects of adding sulfur fertilizer application on nitrogen accumulation and distribution of waxy maize at maturity

2.4 氮素利用率

与N处理相比(表2), JKN2000、SYN5的氮收获指数和氮肥偏生产力在N+S处理下分别提高3.2% ($P < 0.05$)、5.9% ($P < 0.05$) 和 3.7% ($P < 0.01$)、5.3% ($P <$

0.01), 氮素子粒生产效率分别降低8% ($P < 0.05$)、3.8% ($P < 0.05$), 且JKN2000显著高于SYN5($P < 0.01$)。

2.5 硫素积累与分配

JKN2000的硫素积累总量显著高于SYN5($P <$

表2 增施硫肥对糯玉米氮素利用率的影响

Table 2 Effects of increasing sulfur fertilizer application on nitrogen use efficiency of waxy maize

品 种	处 理	氮收获指数	氮素子粒生产效率(kg/kg)	氮肥偏生产力
Variety	Treatment	(%)	Nitrogen utilization efficiency	(kg/kg)
		Nitrogen harvest index	for grain production	Nitrogen partial factor productivity
JKN2000	N	57.8 b	56.9 a	39.5 b
	N+S	61.0 a	48.9 b	45.4 a
SYN5	N	49.8 c	45.7 bc	27.3 d
	N+S	53.5 b	41.9 c	32.6 c
F值	品 种	50.7**	25.6**	172.4**
	处 理	10.0*	10.9*	34.1**
	品种×处理	0.1	1.4	0.1

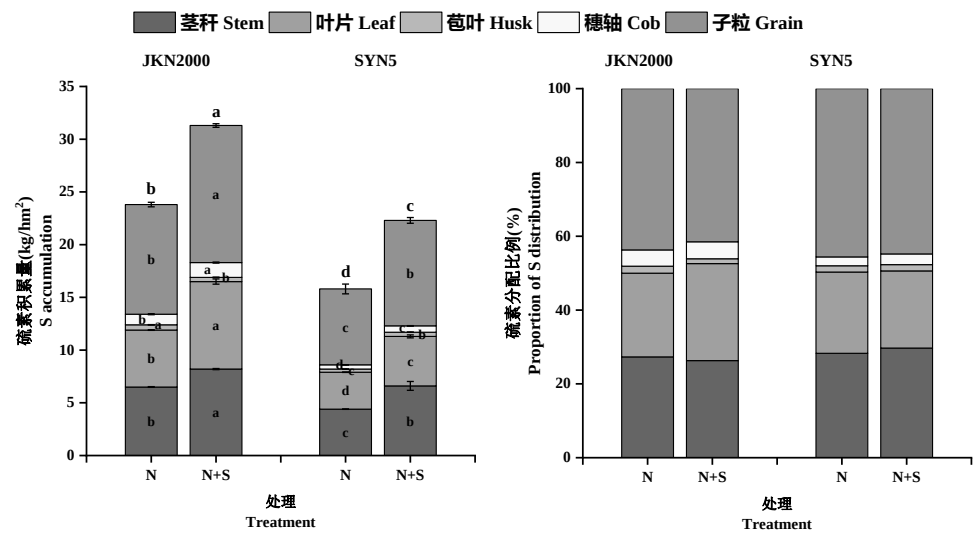


图4 增施硫肥对成熟期糯玉米硫素积累与分配的影响

Fig.4 Effects of adding sulfur fertilizer application on sulfur accumulation and distribution of waxy maize at maturity

0.01), N+S 处理下硫素积累总量分别提高 31.5% (JKN2000)和 41.1%(SYN5),差异显著(图4)。成熟期糯玉米各器官硫素分配中以子粒占比最大(变幅为 41.5% ~ 45.6%)。

2.6 糯玉米糊化特性

增施硫肥对成熟期糯玉米和淀粉糊化特性有显

著影响(表3)。JKN2000 糯玉米粉的峰值黏度和崩解值均低于 SYN5($P<0.01$),两个品种糯玉米粉峰值黏度和崩解值在 N+S 处理下显著降低,回复值显著升高(图5)。增施硫肥处理降低了 JKN2000 淀粉的回复值和糊化温度,显著提高了峰值黏度和崩解值; SYN5 的糊化特征值均有所下降。

表3 增施硫肥对成熟期糯玉米糊化特性的影响

Table 3 Effects of adding sulfur fertilizer application on gelatinization characteristics of waxy maize at maturity

品 种	处 理	糯玉米粉 Waxy maize flour					
		峰值黏度	谷值黏度	崩解值	终值黏度	回复值	糊化温度(℃)
		(cP)	(cP)	(cP)	(cP)	(cP)	Gelatinization temperature
		Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	temperature
JKN2000	N	1 688.3 c	1 182.7 d	505.7 c	1 455.7 d	273.0 d	76.9 c
	N+S	1 586.0 d	1 347.3 c	238.7 d	1 777.3 c	430.0 b	78.3 b
SYN5	N	2 572.7 a	1 589.0 a	983.7 a	1 981.0 a	392.0 c	79.5 a
	N+S	2 158.7 b	1 457.7 b	701.0 b	1 917.7 b	460.0 a	79.1 ab

续表 3 Continued 3

品 种 Variety	处 理 Treatment	糯玉米粉 Waxy maize flour					
		峰值黏度 (cP)	谷值黏度 (cP)	崩解值 (cP)	终值黏度 (cP)	回复值 (cP)	糊化温度(℃) Gelatinization temperature
		Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	
F 值	品 种	1 349.6**	460.0**	1 624.4**	776.5**	186.0**	69.1**
	处 理	169.5**	1.9	555.1**	116.9**	424.2**	7.1*
	品种×处理	61.8**	151.0**	0.5	259.7**	66.4**	18.0**

品 种 Variety	处 理 Treatment	淀粉 Starch					
		峰值黏度 (cP)	谷值黏度 (cP)	崩解值 (cP)	终值黏度 (cP)	回复值 (cP)	糊化温度(℃) Gelatinization temperature
		Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	
JKN2000	N	831.7 d	347.7 d	484.0 d	420.0 d	72.3 a	75.9 b
	N+S	1 030.0 c	419.0 c	611.0 c	487.0 c	68.0 ab	75.7 b
SYN5	N	1 840.7 a	972.7 a	868.0 a	1 035.0 a	62.3 b	78.4 a
	N+S	1 500.7 b	696.0 b	804.7 b	757.7 b	61.7 b	78.2 a
F 值	品 种	4 477.3**	6 805.2**	1 360.0**	8 247.3**	14.6**	65.7**
	处 理	41.0**	352.7**	16.5**	465.1**	1.4	0.5
	品种×处理	592.6**	1 013.0**	147.6**	1 246.6**	0.7	0.1

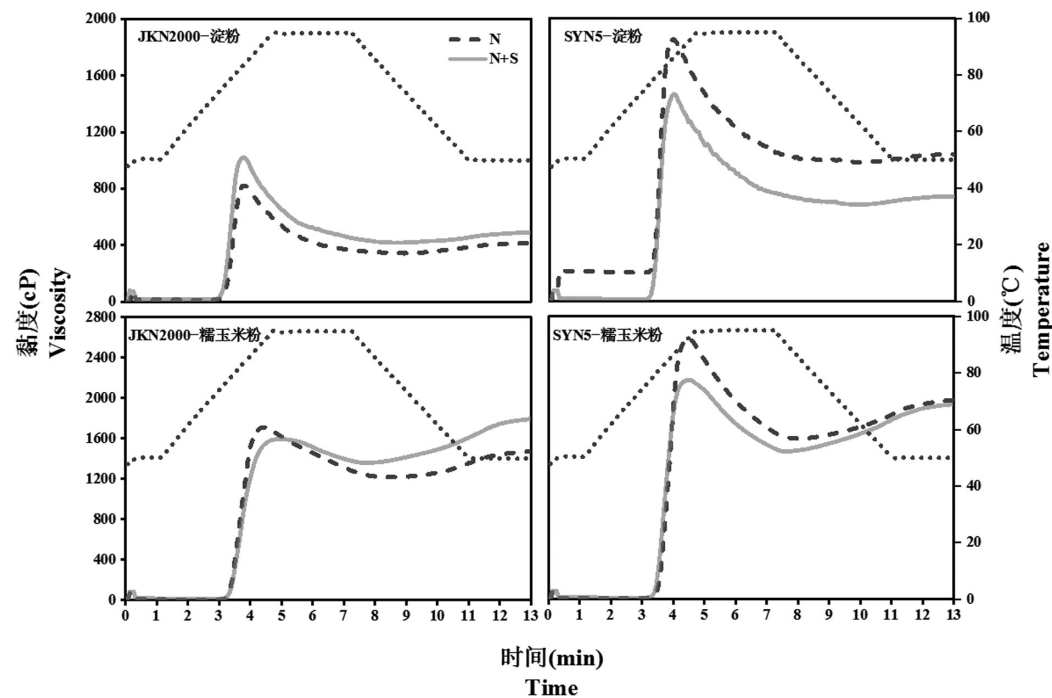


图 5 增施硫肥对成熟期糯玉米糊化特性的影响

Fig.5 Effects of adding sulfur fertilizer application on gelatinization characteristics of waxy maize at maturity

2.7 糯玉米热力学特性

由表 4 可以看出,增施硫肥显著降低了两个品种糯玉米粉和淀粉的回生热焓值和回生值($P<0.01$), JKN2000 较 SYN5 的糯玉米粉热力学特征值低($P<0.01$),淀粉的热焓值、胶凝温度(起始、峰值、终值温度)和回生热焓值高($P<0.01$),回生值低($P<0.01$)。

2.8 相关分析

相关分析结果表明(图 6),本试验条件下干物质与氮、硫素积累、胶凝温度(起始、峰值和终值温度)呈正相关,与峰值黏度、谷值黏度、崩解值、终值黏度和糊化温度呈负相关。

表4 增施硫肥对成熟期糯玉米热力学特性的影响

Table 4 Effects of adding application of sulfur fertilizer on thermodynamic characteristics in mature waxy maize

品 种 Variety	处 理 Treatment	糯玉米粉 Waxy maize flour					
		热焓值(J/g)	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	终值温度(℃)	回生热焓值(J/g)	回生值(%)
		ΔH_{gel}	T_o	T_p	T_c	ΔH_{ret}	R
JKN2000	N	8.5 b	70.0 c	75.5 b	82.7 ab	3.1 b	36.4 a
	N+S	7.5 c	70.1 c	75.7 b	82.2 b	2.2 d	29.6 d
SYN5	N	9.0 a	72.4 b	77.5 a	83.5 a	3.2 a	36.1 b
	N+S	8.2 b	73.0 a	77.6 a	83.4 a	2.6 c	31.9 c
F 值	品 种	64.8**	1219.0**	640.8**	24.7**	82.9**	4.4
	处 理	135.2**	19.0**	1.7	2.6	679.1**	137.2**
	品种×处理	1.8	6.9*	0.2	1.2	19.6**	7.5*

品 种 Variety	处 理 Treatment	淀粉 Starch					
		热焓值(J/g)	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	终值温度(℃)	回生热焓值(J/g)	回生值(%)
		ΔH_{gel}	T_o	T_p	T_c	ΔH_{ret}	R
JKN2000	N	12.7 c	66.2 c	71.5 b	79.4 b	5.9 b	47.0a
	N+S	12.1 c	65.5 d	71.1 c	79.5 b	5.4 c	45.1ab
SYN5	N	15.5 a	69.8 a	74.5 a	81.1 a	6.8 a	44.1b
	N+S	14.2 b	69.1 b	74.3 a	81.0 a	5.2 d	37.0c
F 值	品 种	248.9**	3 852.1**	3 145.1**	111.0**	3 710.0**	108.4**
	处 理	35.6**	154.1**	29.5**	0.1	36 117.8**	70.7**
	品种×处理	5.5*	0.8	5.8*	0.8	9 780.2**	24.1**

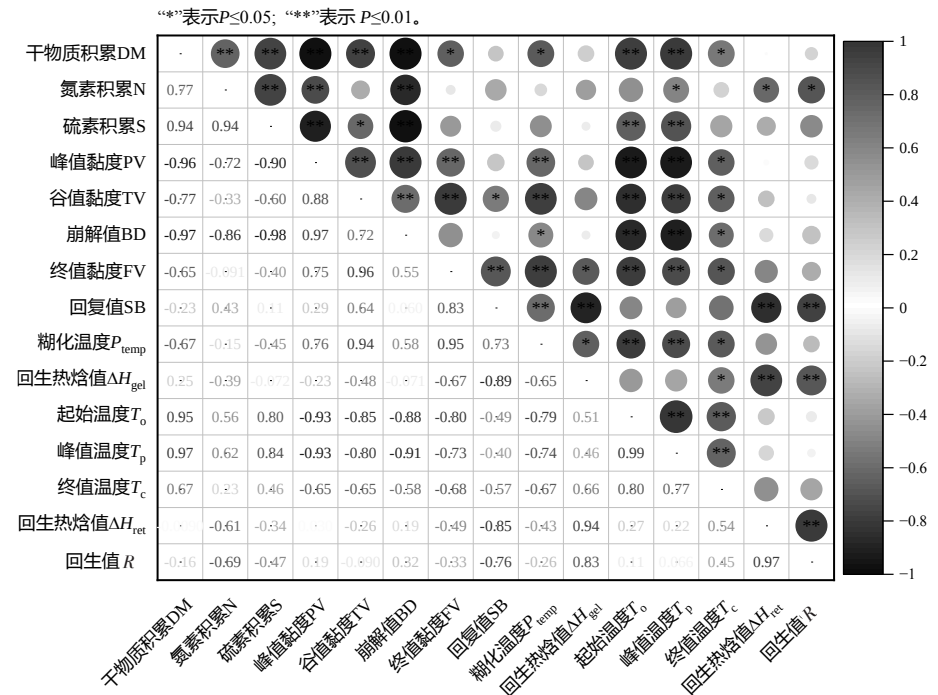


图6 干物质、氮素及硫素积累与子粒品质指标之间的相关性

Fig.6 Correlation between dry matter, nitrogen and sulfur accumulation and grain quality indexes

3 结论与讨论

本研究表明,正常施肥条件下增施硫肥对成熟

期糯玉米子粒产量和品质影响显著。增施硫肥可以提高糯玉米子粒产量,增加成熟期干物质和氮、硫素积累,同时提高氮收获指数和氮肥偏生产力,调优糯

玉米粉和淀粉的糊化特性和热力学特性,改善糯玉米品质。因此,在江苏省糯玉米生产中建议合理增施硫肥或在复合肥料中添加硫元素,实现糯玉米的高产优质栽培。

增施硫肥可以增加玉米干物质积累和产量^[22],硫肥过量会降低玉米产量^[23]。本研究发现,增施硫肥提高糯玉米的干物质积累和产量,干物质积累是产量形成的基础,增施硫肥会增加干物质积累及子粒分配占比,进而提高子粒产量^[24]。

合理施用硫肥可以提高夏玉米整个生育期内各器官的氮、硫素积累,有效促进玉米对氮、硫素的吸收利用^[25]。本研究表明,增施硫肥提高了植株在成熟期的氮素积累和硫素积累,主要是由于氮、硫素在植株体内的生理功能和同化途径类似,一种元素的缺乏会影响另一种元素的同化,二者之间存在正向交互效应。玉米植株的氮素和硫素吸收积累量具有极显著正相关关系^[26]。本研究中,成熟期糯玉米植株氮、硫素积累之间呈显著正相关,表明玉米氮素的同化积累与硫素的同化积累之间存在协同作用。增施硫肥处理下糯玉米的氮收获指数和氮肥偏生产力显著提高^[27],表明增施硫肥有利于糯玉米植株对氮素的吸收转运,进而增加氮收获指数和氮肥偏生产力^[28]。

合理施氮基础上增施硫肥改变小麦面粉中二硫键的含量,从而影响面粉的黏度^[29]。本研究表明,增施硫肥处理下糯玉米粉峰值黏度和崩解值呈降低趋势,其他糊化特征值变化不一,可能是增施硫肥促进氮素吸收致使蛋白质中不溶性蛋白比例增加,二硫键比例降低,造成黏度下降。峰值黏度、谷值黏度和崩解值之间呈显著正相关^[30]。淀粉回生值和回生热焓值呈极显著正相关,与热焓值呈负相关^[31]。本研究中,糯玉米粉和淀粉的回生值在增施硫肥处理下显著降低,回生值和回生热焓值呈显著正相关,表明增施硫肥提高糯玉米粉和淀粉的热稳定性,降低回生值,品质得到改善。

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. Research progress and prospect of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] 娄菲,左铎平,李萌,等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2023, 50(4): 1-14.
LOU F, ZUO Y P, LI M, et al. Effects of organic fertilizer replacing part of chemical fertilizer nitrogen on yield, quality and nitrogen utilization of waxy maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 50(4): 1-14. (in Chinese)
- [3] 赵久然,卢柏山,史亚兴,等. 我国糯玉米育种及产业发展动态[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 67-71.
ZHAO J R, LU B S, SHI Y X, et al. Dynamics of waxy maize breeding and industry development in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(4): 67-71. (in Chinese)
- [4] 谢孝颐,薛林,石明亮,等. 糯玉米的综合利用[J]. 作物杂志, 1993(2): 37-38.
XIE X Y, XUE L, SHI M L, et al. Comprehensive utilization of waxy maize[J]. Crops, 1993(2): 37-38. (in Chinese)
- [5] Frontiers Production Office. Erratum: Nitrogen supply affects yield and grain filling of maize by regulating starch metabolizing enzyme activities and endogenous hormone contents[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 882425.
- [6] 谢瑞芝. 玉米基因型的硫效率差异及氮硫互作对产量、品质影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [7] 刘烁然. 施硫提高玉米产量、品质及养分利用效率的生理机制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [8] 周杰,王东,满建国,等. 高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 42-51.
ZHOU J, WANG D, MAN J G, et al. Effects of sulfur and nitrogen interaction on growth, nitrogen and sulfur uptake and utilization of winter wheat seedlings under high nitrogen conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(1): 42-51. (in Chinese)
- [9] 刘存辉,董树亭,胡昌浩. 硫素水平对夏玉米产量及生理特性影响的研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(增刊): 95-97, 100.
LIU C H, DONG S T, HU C H. Effects of sulfur levels on yield and physiological characteristics of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(S2): 95-97, 100. (in Chinese)
- [10] 刘烁然,应飞宇,崔帅,等. 氮硫互作对玉米苗期生长及养分吸收的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(5): 148-154.
LIU S R, YING F Y, CUI S, et al. Effects of nitrogen and sulfur interaction on growth and nutrient uptake of maize at seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(5): 148-154. (in Chinese)
- [11] 曹殿云,王宏伟,徐晓旭. 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1298-1305.
CAO D Y, WANG H W, XU X X. Effects of sulfur fertilizer dosage on nitrogen and sulfur absorption and distribution and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1298-1305. (in Chinese)
- [12] 熊伟屹,徐开未,刘明鹏,等. 不同氮用量对四川春玉米光合特性、氮利用效率及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(9): 1735-1748.
XIONG W Y, XU K W, LIU M P, et al. Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics, nitrogen use efficiency and yield of spring maize in Sichuan[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(9): 1735-1748. (in Chinese)
- [13] 李立江,蒋明金,何星雷,等. 施氮量对优质稻G优325氮肥利用率和产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 42(3): 1-14.
LI L J, JIANG M J, HE X L, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen efficiency and yield of high quality rice GYOU325[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 42(3): 1-14.

- (in Chinese)
- [14] 陆大雷,王鑫,孙旭利,等.基肥配施和拔节期追氮对糯玉米粉糊化特性的影响[J].中国农业科学,2013,46(5):909-916.
LU D L, WANG X, SUN X L, et al. Effects of combination application of base fertilizer and nitrogen supplementation at jointing stage on flour paste characteristics of waxy maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(5): 909-916. (in Chinese)
- [15] 陆大雷,王德成,景立权,等.基肥配比和拔节期追施氮肥对糯玉米淀粉胶凝和回生特性的影响[J].作物学报,2009,35(5):867-874.
LU D L, WANG D C, JING L Q, et al. Effects of base fertilizer ratio and nitrogen application at jointing stage on the gelling and recovery characteristics of waxy maize starch[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(5): 867-874. (in Chinese)
- [16] 陆大雷,郭换粉,董策,等.拔节期追氮对鲜食糯玉米粉糊化和热力学特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):48-54.
LU D L, GUO H F, DONG C, et al. Effects of nitrogen supplementation on pasting and thermodynamic properties of fresh waxy maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(1): 48-54. (in Chinese)
- [17] LI N, YANG Y, WANG L Q, et al. Combined effects of nitrogen and sulfur fertilization on maize growth, physiological traits, N and S uptake, and their diagnosis[J]. Field Crops Research, 2019, 242: 107593-107593.
- [18] SAMAR S, DOVILE A, ROMAS M, et al. Comparative study effect of urea-sulfur fertilizers on nitrogen uptake and maize productivity [J]. Plants, 2022, 11(22): 3020.
- [19] 申丹丹,牛铁男,朱敏,等.氮、硫肥配施对稻茬麦氮素利用及子粒产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2022,42(2):188-195.
SHEN D D, NIU Y N, ZHU M, et al. Effects of combined application of nitrogen and sulfur fertilizer on nitrogen utilization and grain yield and quality of rice stubble and wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(2): 188-195. (in Chinese)
- [20] CARCIOCHI W D, SADRAS V O, PAGANI A, et al. Co-limitation and stoichiometry capture the interacting effects of nitrogen and sulfur on maize yield and nutrient use efficiency[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 113: 125973.
- [21] LU D L, CAI X M, LU W P. Effects of water deficit during grain filling on the physicochemical properties of waxy maize starch[J]. Starch-Stärke, 2015, 67: 692-700.
- [22] RAHMAN M, SOAUD A, DARWISH F, et al. Effects of sulfur and nitrogen on nutrients uptake of corn using acidified water[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10: 8275-8283.
- [23] 李娜.夏玉米产量与氮硫吸收利用对氮硫肥的响应[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [24] 李娜,杨阳,赵玉霞,等.施用硫肥对关中地区夏玉米硫素吸收及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):168-172.
LI N, YANG Y, ZHAO Y X, et al. Effects of sulfur fertilizer application on sulfur absorption and yield of summer maize in Guanzhong area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 168-172. (in Chinese)
- [25] SALVAGIOTTI F, CASTELLARÍN M J, MIRALLES J D, et al. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake[J]. Field Crops Research, 2009, 113(2): 170-177.
- [26] 赵玉霞,周芳,李雪芳,等.氮硫配施对冬小麦氮硫吸收转运及利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1020-1028.
ZHAO Y X, ZHOU F, LI X F, et al. Effects of nitrogen and sulfur combined application on nitrogen and sulfur absorption, transport and utilization efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1020-1028. (in Chinese)
- [27] 王美,赵广才,石书兵,等.氮肥底追比例及施硫对小麦氮素吸收利用的调控[J].核农学报,2017,31(5):954-963.
WANG M, ZHAO G C, SHI S B, et al. Regulation of nitrogen uptake and utilization by nitrogen fertilizer base and sulfur application in wheat[J]. Journal of Nuclear Agriculture Sciences, 2017, 31(5): 954-963. (in Chinese)
- [28] 李昊,耿玉辉,曹国军,等.硫肥配施对不同氮磷钾水平下春玉米生长及氮肥利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2023(6):206-212.
LI H, GENG Y H, CAO G J, et al. Effects of combined application of sulfur fertilizer on growth and nitrogen use efficiency of spring maize under different levels of nitrogen, phosphorus and potassium [J]. Soil and Fertilizer Sciences in Chinese, 2023(6): 206-212. (in Chinese)
- [29] CAI J, ZHANG F J, XIN L, et al. Effects of cysteine and inorganic sulfur applications at different growth stages on grain protein and end-use quality in wheat[J]. Foods, 2022, 11(20): 3252.
- [30] 陆大雷,景立权,王德成,等.拔节期追氮对不同季节糯玉米淀粉糊化特性的影响[J].生态学报,2010,30(2):549-555.
LU D L, JING L Q, WANG D C, et al. Effects of nitrogen supplementation on starch gelatinization in different seasons of waxy maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 549-555. (in Chinese)
- [31] 刘萍,陆大雷,孙建勇,等.拔节期追氮对春播和秋播糯玉米淀粉胶凝和回生特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):543-551.
LIU P, LU D L, SUN J Y, et al. Effects of nitrogen supplementation at jointing stage on starch gelling and regeneration characteristics of waxy maize sown in spring and autumn[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(3): 543-551. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)