

氮肥基追比对花后高温胁迫下 春小麦淀粉形成的影响

慕 宇, 朱 荣, 孙立影, 康建宏

(宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 采用盆栽的方法研究不同的氮肥基追比对高温胁迫春小麦花后淀粉形成和产量的影响。结果表明: 高温胁迫条件下, 宁春 4 号和宁春 47 号籽粒直链淀粉、支链淀粉以及淀粉总含量、淀粉形成关键酶 (ADPG-PPase、UDPG-PPase、SSS、GBSS) 活性、千粒重和生物产量等与常温处理相比显著降低。两个品种氮肥基追比 3:7 和 4:6 条件下的直链淀粉含量、AGPP-PPase、GBSS、千粒重、生物产量等均优于氮肥基追比 5:5、7:3、6:4 的处理。因此, 花后高温降低了籽粒淀粉的含量、关键酶活性, 从而降低了小麦产量和品质, 而合理的氮肥基追比 (3:7 和 4:6) 能减轻高温对春小麦产量以及淀粉品质的影响。生产上可以采取相应的措施缓解高温的危害, 提高春小麦产量和品质。

关键词: 春小麦; 高温; 氮素; 淀粉; 产量

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature on the formation of starch after anthesis of spring wheat

MU Yu, ZHU Rong, SUN Li-ying, KANG Jian-hong

(School of Agriculture, Ningxia University, Yingchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature on the formation of starch and yield after anthesis in spring wheat were studied by pot experiment. The result showed that, under high temperature, grain amylose, amylopectin, the concentration of total starch, key enzymes (ADPG-PPase, UDPG-PPase, SSS, GBSS) activity and yield of Ningchun 4 and Ningchun 47 were lower than the normal temperature processing. The concentration of amylose, the activity of AGPP-PPase, GBSS following the nitrogen dressing ratios of N1 (3:7) and N2 (4:6) were higher than the other nitrogen dressing ratios. Therefore, the concentration of starch and key enzymes activity were mainly affected by high temperature after flowering, which then affected the yield and quality. The effect of high temperature the yield and quality could be mitigated by reasonable nitrogen dressing ratios (3:7 and 4:6). For this reason, it was suggested that the reasonable measures could be taken to ease the harm of high temperature and improve the yield and quality of the spring wheat.

Keywords: spring wheat; high temperature; nitrogen; starch; yield

小麦 (*Triticum aestivum*) 是主要的粮食作物之一, 全世界有 1/3 以上的人口以小麦为主食。小麦也是我国北方人民的主要粮食作物, 其产量及品质直接关系到国计民生。春小麦在我国西北地区种植面积比较广泛, 性喜冷凉, 灌浆适宜温度为 20℃ ~ 22℃, 对过高的温度反应敏感。宁夏平原在春小麦

灌浆期, 日最高气温超过 30℃ 的天气频发, 因此高温成为了春小麦生产的主要胁迫因子^[1-2]。小麦籽粒的充实过程与淀粉积累量有一定关系, 在籽粒灌浆阶段高温胁迫会使淀粉形成受到抑制, 并显著影响小麦籽粒中淀粉形成关键酶的合成, 使总淀粉积累量减少, 因此对春小麦产量及品质造成影响^[3]。

灌浆期高温胁迫会显著降低支链淀粉含量,但对直链淀粉含量影响较小^[4]。而且在不同的灌浆阶段温度超过 35℃时,会显著降低直链、支链、总淀粉含量。在灌浆初期受到高温胁迫时,对淀粉积累量的影响更显著,主要表现为灌浆期缩短、淀粉粒合成过程过早结束^[5]。氮肥在春小麦生长发育过程中发挥着重要的作用,适宜的氮肥用量对实现春小麦优质高产意义重大。因此,缓解灌浆期高温胁迫对春小麦产生的危害,氮素发挥着极为重要的作用,它不仅能够使产量提高,还能改善其品质性状,合理运筹氮肥比例是提高小麦产量及改善品质的重要举措。有研究认为,氮肥基追比 8:2 或 7:3 为宜,分别在拔节期和孕穗期进行追施,可以提高小麦的穗粒数、千粒重等^[6]。也有研究表明,氮肥基追比为 3:7 和 4:6 时,有利于产量的提高^[7]。赵晶晶等^[8]研究了不同施氮量对花后高温胁迫下春小麦产量形成的影响,得到了适宜的施氮量,在此基础上,我们进一步研究不同氮肥基追比对花后高温胁迫的春小麦淀粉形成的影响,可为春小麦优质高产提供理论依据和技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料

供试春小麦的品种为宁夏主栽品种宁春 4 号和宁春 47 号,种子由宁夏农林科学院农作物研究所小麦室提供。盆栽用土取自大田 0~20 cm 的耕层,每盆栽过筛干土 9 kg,土壤有机质含量为 11.9 g·kg⁻¹,速效磷含量 28.6 mg·kg⁻¹,速效钾 64.3 mg·kg⁻¹,pH 为 7.92,碱解氮 72.1 mg·kg⁻¹。盆钵直径 30 cm,高 25 cm。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2014 年在宁夏大学农学院试验基地以盆栽的形式进行。试验采取裂区设计,主处理为温度,设置高温 35℃±2℃(T2)和常温 27℃±2℃(T1,CK)两个水平。副处理为不同氮肥基追比,氮肥总施用量为 0.9 g·盆⁻¹,设 3:7、4:6、5:5、7:3、6:4 五个氮肥基追比水平,分别以 N1、N2、N3、N4、N5 来表示。作基肥时,按试验设计比例与磷肥(2.5 g·盆⁻¹)混匀后于播前施入土中;作追肥时,按试验设计比例分别在分蘖期、拔节期、孕穗期和开花期进行施肥。花前小麦在自然条件下生长,花后 18~22 d 进行温度处理,处理时间为每天 9:00—17:00,于人工气候室内进行,温度过高时通风,连续处理 5 d,夜晚为常温。空气相对湿度保持在 50%,土壤水分保

持在 65%~75%,高温处理结束后,将小麦移到自然条件下生长至成熟。

1.3 样品采集及测定方法

开花期,标记同日开花的麦穗。花后 10 d 开始取样,间隔 5 d 进行一次采样,杀青烘至恒重,称重后保存。淀粉含量参照邹琦^[9]的双波长法测定。淀粉形成关键酶测定(SBE、ADPG-PPase、UDPG-PPase、SSS、GBSS)参照李太贵等^[9-10]的方法。小麦成熟后无损失收获,自然风干,每个处理取 20 株考种,调查穗粒数、穗粒重、千粒重、单株生物产量等。

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 统计分析软件对试验数据进行统计分析。

2 结果分析

2.1 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒淀粉含量的影响

由图 1 可知,正常条件下,随着生育期推进,籽粒中直链和支链淀粉均表现为逐渐上升趋势,花后 10 d 上升速度迟缓,15~20 d 上升幅度较大,随着小麦植株的衰老,高温胁迫使花后 25 d 直连淀粉和支链含量逐渐下降。花后 10~15 d 相同温度各处理下直链淀粉变化不明显,但在高温胁迫下,两品种籽粒中直链淀粉含量均低于常温下的各氮肥处理。其中,花后 25 d 宁春 4 号在 T2N1、T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 处理条件下的直链淀粉含量较 T1N1、T1N2、T1N3、T1N4、T1N5 分别降低了 33.15%、13.99%、28.15%、50.89%、30.39%;而宁春 47 号在 T2N1、T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 处理条件下的直链淀粉含量较 T1N1、T1N2、T1N3、T1N4、T1N5 分别降低了 26.79%、10.55%、8.93%、43.43%、29.19%,高温条件下氮肥基追比为 N2(4:6)较其它处理直链淀粉含量降低较少。对于支链淀粉来说,高温条件下不同氮肥基追比之间比较,宁春 4 号在花后 20 d 在 T2N1、T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 处理条件下支链淀粉含量较 T1N1、T1N2、T1N3、T1N4、T1N5 分别降低了 9.45%、0.03%、1.25%、19.04%、4.54%;而宁春 47 号在花后 20 d 在 T2N1、T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 处理条件下支链淀粉含量较 T1N1、T1N2、T1N3、T1N4、T1N5 分别降低了 16.78%、18.44%、31.22%、36.86%、34.90%,说明高温条件下氮肥处理 N2(4:6)较其它氮肥处理的支链淀粉降低较少。综合来看适当氮肥基追比能够提高籽粒淀粉积累量,以 N2(4:6)处理效果最好。

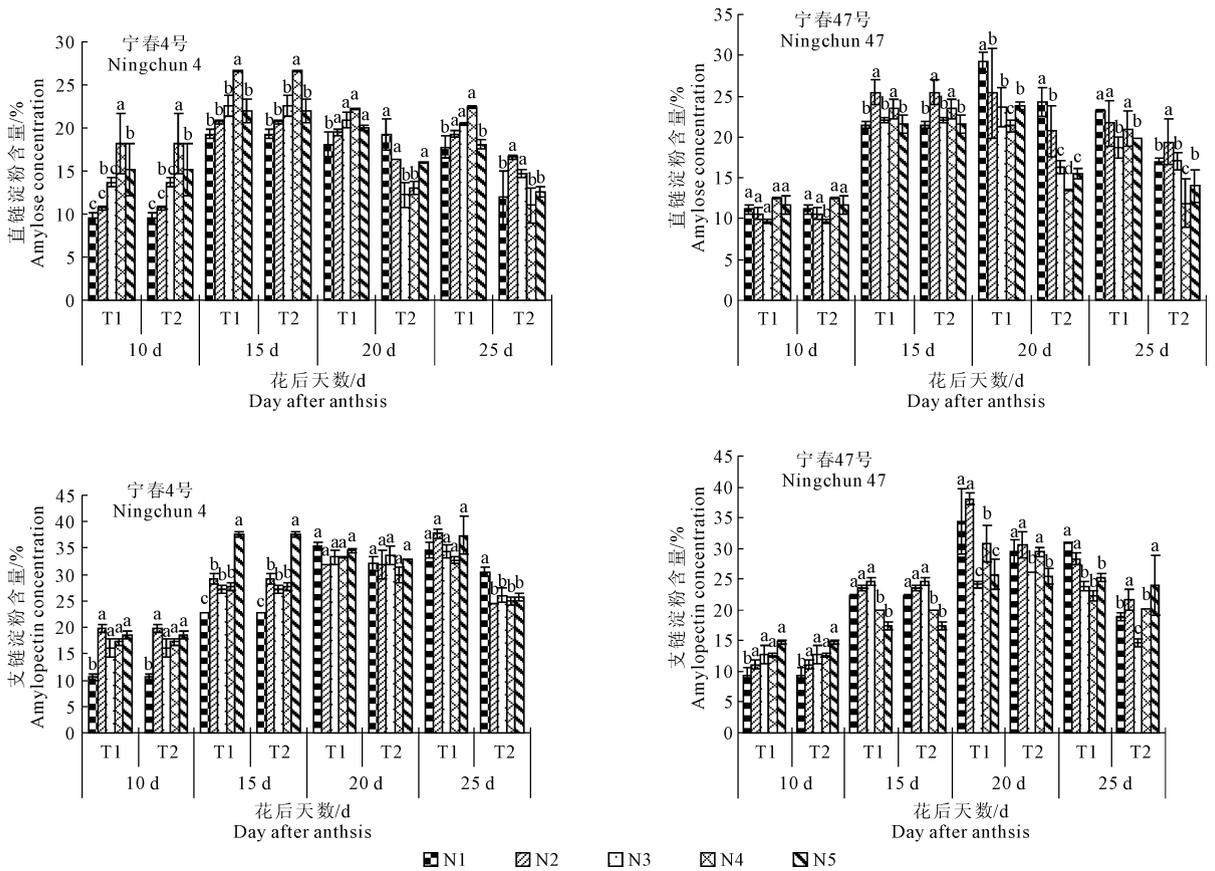


图 1 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒中直链淀粉、支链淀粉含量的影响

Fig.1 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the concentration of amylose and amylopectin

注:不同小写字母表示各氮肥处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

由表 1 可知,随着小麦植株的生长,籽粒中总淀粉含量逐渐升高,前期增长缓慢,花后 15 d 上升幅度增大,两品种变化趋势基本一致。高温胁迫下氮肥各基追比处理之间差异显著。高温胁迫下宁春 4 号花后 25 d 籽粒中总淀粉含量表现为 $N2 > N1 > N5 > N4 > N3$, 宁春 47 号表现为 $N5 > N2 > N3 > N4 > N1$ 。高温胁迫下宁春 4 号在花后 25 d $N2(4:6)$ 总淀粉含量较 $N1$ 、 $N3$ 、 $N4$ 、 $N5$ 分别提高了 8.51%、24.71%、13.73%、9.54%,而宁春 47 号在花后 25 d 的 $N5$ 总淀粉含量较 $N1$ 、 $N2$ 、 $N3$ 、 $N4$ 分别提高了 11.45%、2.21%、4.61%、7.08%,说明高温条件下 $N2$ 处理(4:6)较其它处理的总淀粉含量降低较少,这与直链、支链淀粉含量变化趋势基本一致。

2.2 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒淀粉形成关键酶的影响

AGPG-PPase、UDPG-PPase(UDPP)、SBE 等是淀粉合成过程中几种关键酶。其中,AGPG-PPase 是籽粒淀粉合成关键酶之一,其变化与淀粉积累关系密切;GBSS 酶促进直链淀粉合成;SSS、SBE 酶促

进支链淀粉合成^[11]。

由图 2~图 6 可知,几种关键酶在淀粉合成过程中均呈现前期迅速增长,后期逐渐下降的趋势,且峰值均出现在花后 20 d。不同温度处理间,高温胁迫下的 5 种淀粉酶活性均低于常温处理下的淀粉酶活性,且下降幅度明显,差异达显著水平。但 AGPP、UGPP、SSS 对高温胁迫较敏感,如宁春 4 号花后 20 d $T2N4$ 较 $T1N4$ 的 AGPP 活性下降了 23.13%,UGPP 活性下降了 52.32%、SSS 活性降低了 40.00%;宁春 47 号花后 20 d $T2N3$ 较 $T1N3$ 的 AGPP 活性下降了 18.83%,UGPP 活性降低了 35.92%、SSS 活性 51.32%,而宁春 4 号花后 20 d $T2N4$ 较 $T1N4$ 的 GBSS 活性仅下降了 0.95%,SBE 活性仅下降了 19.05%。不同氮肥基追比间,两品种花后 25 d 的 $N1(3:7)$ 、 $N2(4:6)$ 五种淀粉关键酶活性均高于其它氮肥处理酶活性。不同的处理组合相比,宁春 4 号花后 20 d $T2N1$ 较 $T1N1$ 的 ADPG 活性提高了 0.35%;而宁春 47 号花后 20 d 的 $T2N1$ 、 $T2N2$ 、 $T2N3$ 较 $T1N1$ 、 $T1N2$ 、 $T1N3$ 的 UDPG 活性分别降低了 61.14%、62.65%、

35.92%, GBSS 活性分别降低了 66.58%、67.80%、46.45%, SSS 活性分别降低了 29.06%、43.64%、51.32%, SBE 活性分别降低了 59.46%、50%、57.14%。由此可以看出,灌浆期高温抑制了淀粉关

键酶的活性,合理的氮肥基追比(3:7 和 4:6)可以减轻花后高温胁迫对春小麦籽粒中淀粉关键酶活性的影响。

表 1 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒中总淀粉含量的影响(%)

Table 1 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the total starch concentration

品种 Cultivars	处理 Treatments	花后天数 Day after anthesis/d				
		10	15	20	25	
宁春 4 号 Ningchun 4	常温 (T1) Normal temperature	N1	22.81 ± 0.088d	37.39 ± 2.31b	48.60 ± 0.03c	70.14 ± 0.03b
		N2	29.30 ± 1.23b	38.13 ± 3.48bc	44.80 ± 1.13d	64.50 ± 0.39c
		N3	31.23 ± 0.01a	37.33 ± 3.03c	52.03 ± 0.28b	78.86 ± 0.76a
		N4	26.60 ± 0.96c	42.02 ± 4.35b	56.60 ± 0.81a	76.60 ± 1.99b
		N5	28.04 ± 0.55b	46.12 ± 0.50a	49.71 ± 2.03c	62.80 ± 1.48d
	高温 (T2) High temperature	N1	22.81 ± 0.088d	37.39 ± 2.31b	55.21 ± 0.05a	69.30 ± 0.46b
		N2	29.30 ± 1.23b	38.13 ± 3.48bc	52.84 ± 0.21b	75.20 ± 0.29a
		N3	31.23 ± 0.01a	37.33 ± 3.03c	45.22 ± 0.19d	60.30 ± 0.34e
		N4	26.60 ± 0.96c	42.02 ± 4.35b	48.30 ± 0.46c	66.12 ± 0.03c
		N5	28.04 ± 0.55b	46.12 ± 0.50a	42.82 ± 0.02e	68.65 ± 0.77c
宁春 47 号 Ningchun 47	常温 (T1) Normal temperature	N1	20.45 ± 0.29b	43.85 ± 2.19b	44.30 ± 0.57e	74.28 ± 0.06b
		N2	21.70 ± 1.99b	48.99 ± 2.25a	51.10 ± 0.02cd	78.21 ± 1.15a
		N3	22.39 ± 3.45b	46.73 ± 2.00a	56.30 ± 2.12b	64.43 ± 2.98d
		N4	25.15 ± 3.78a	43.39 ± 2.56b	56.90 ± 0.09b	73.32 ± 1.58b
		N5	26.51 ± 0.52a	47.50 ± 0.003a	61.10 ± 2.37a	65.07 ± 0.59d
	高温 (T2) High temperature	N1	20.45 ± 0.29b	43.85 ± 2.19b	55.50 ± 3.13bc	65.14 ± 3.27d
		N2	21.70 ± 1.99b	48.99 ± 2.25a	48.15 ± 1.06de	71.03 ± 4.64b
		N3	22.39 ± 3.45b	46.73 ± 2.00a	44.70 ± 2.25e	69.40 ± 1.86c
		N4	25.15 ± 3.78a	43.39 ± 2.56b	53.01 ± 1.29bc	67.80 ± 0.82c
		N5	26.51 ± 0.52a	47.50 ± 0.003a	48.85 ± 0.87d	72.60 ± 0.71b

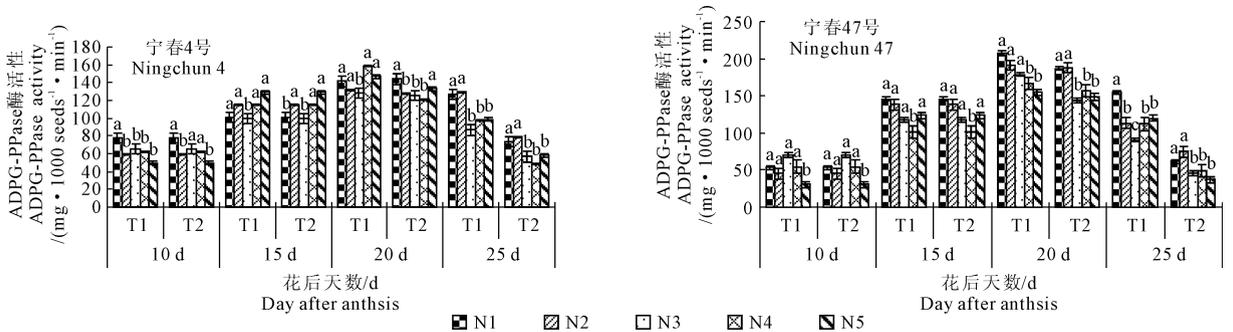


图 2 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒 ADPG - PPase 酶活性的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the activity of ADPG - PPase

2.3 GBSS、SBE 等淀粉关键酶、直链淀粉、支链淀粉与总淀粉的相关性分析

由表 2 与表 3 知,随着生育期推进,宁春 4 号总淀粉含量与几种淀粉合成酶、直链、支链淀粉有相关性。常温处理下,总淀粉含量与 AGPG - PPase、UDPG - PPase、直链淀粉等呈正相关关系,高温胁迫

条件下,总淀粉含量与 UDPG - PPase、支链淀粉、SSS 等呈正相关,但相关系数较常温处理下的各测定项目间相关性较小。宁春 47 号的总淀粉与测定项目之间的相关性与宁春 4 号基本一致,常温处理下的各测定项目间的相关系数较大且显著。由此可以看出高温胁迫干扰了淀粉形成关键酶的活性,缩短淀

粉积累的过程, SSS 反应最为敏感, 降低了直链、支链和总淀粉含量, 植株提前早衰, 最终导致产量降

低、品质变差。因此要注意防控小麦生育前期高温的伤害。

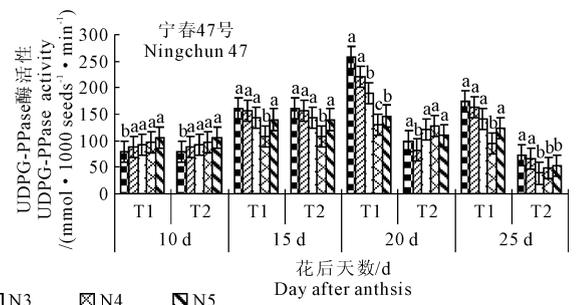
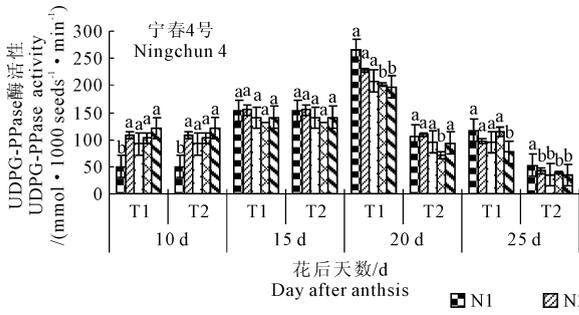


图 3 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒 UDPG - PPase 酶活性的影响

Fig.3 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the activity of UDPG - PPase

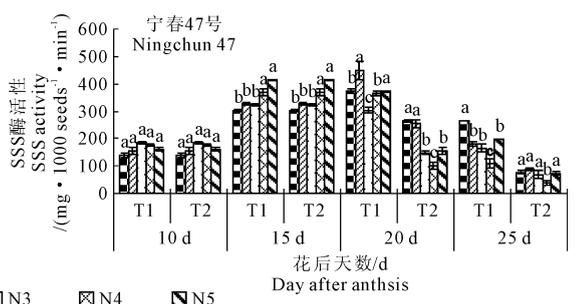
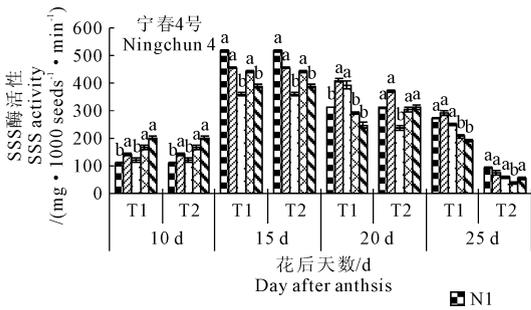


图 4 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒 SSS 酶活性的影响

Fig.4 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the activity of SSS

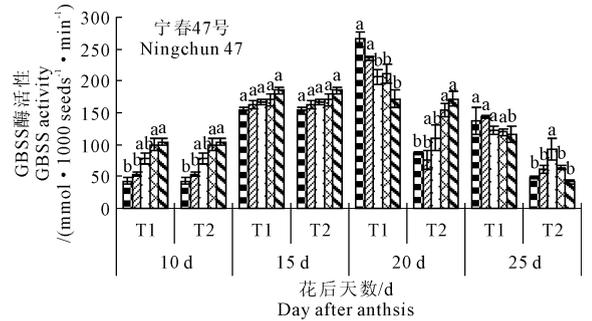
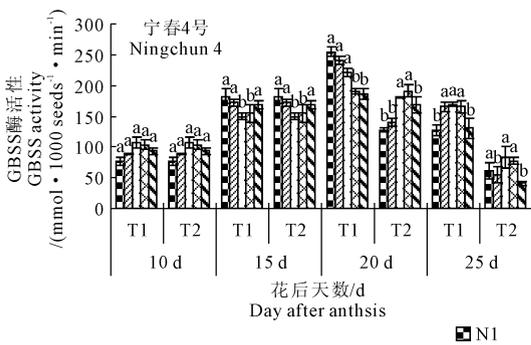


图 5 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒 GBSS 酶活性的影响

Fig.5 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the activity of GBSS

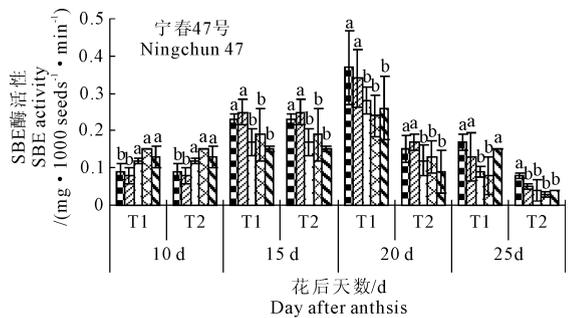
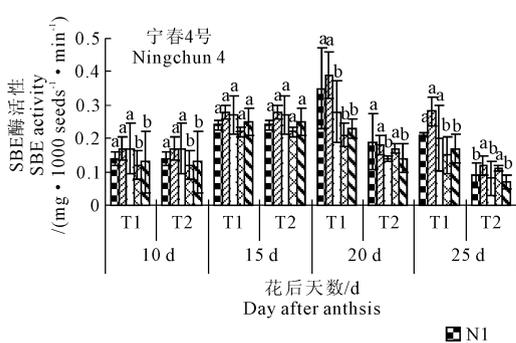


图 6 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦籽粒 SBE 酶活性的影响

Fig.6 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the activity of SBE

表 2 宁春 4 号 GBSS、SBE 等淀粉关键酶、直链淀粉、支链淀粉与总淀粉的相关系数

Table 2 The correlation coefficient of GBSS, SBE etc, amylose, amylopectin and the concentration of total starch in Ningchun 4

处理 Treatment	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	总淀粉 Total starch	ADPG	UDPG	GBSS	SBE
支链淀粉 Amylopectin	0.64**						
总淀粉 Total starch	0.67**	0.84**					
常温(T1) Normal temperature	ADPG - PPase	0.58**	0.77**	0.89**			
	UDPG - PPase	0.39	0.43	0.68**	0.68**		
	GBSS	0.58**	0.68**	0.81**	0.79**	0.86**	
	SBE	0.38	0.54*	0.56**	0.69**	0.75**	0.85**
	SSS	0.68**	0.41	0.47*	0.55**	0.55*	0.66**
支链淀粉 Amylopectin	0.84**						
总淀粉 Total starch	0.87**	0.81**					
高温(T2) High temperature	ADPG - PPase	0.90**	0.87**	0.83**			
	UDPG - PPase	0.80**	0.83**	0.62**	0.86**		
	GBSS	0.88**	0.81**	0.76**	0.89**	0.84**	
	SBE	0.73**	0.70**	0.58**	0.84**	0.83**	0.87**
	SSS	0.72**	0.58**	0.65**	0.74**	0.64**	0.85**

表 3 宁春 47 号 GBSS、SBE 等淀粉关键酶、直链淀粉、支链淀粉与总淀粉的相关系数

Table 3 The correlation coefficient of GBSS, SBE etc, amylose, amylopectin and the concentration of total starch in Ningchun 47

处理 Treatment	直链淀粉 Amylose	支链淀粉 Amylopectin	总淀粉 Total starch	ADPG	UDPG	GBSS	SBE
支链淀粉 Amylopectin	0.35						
总淀粉 Total starch	0.41	0.81**					
常温(T1) Normal temperature	ADPG - PPase	0.49*	0.71**	0.90**			
	UDPG - PPase	0.71**	0.20	0.37	0.49*		
	GBSS	0.50*	0.50*	0.64**	0.79**	0.71**	
	SBE	0.70**	0.25	0.42	0.58**	0.87**	0.72**
	SSS	0.74**	0.43*	0.62**	0.75**	0.87**	0.86**
支链淀粉 Amylopectin	0.56**						
总淀粉 Total starch	0.78**	0.87**					
高温(T2) High temperature	ADPG - PPase	0.64**	0.79**	0.89**			
	UDPG - PPase	0.47*	0.27	0.55*	0.59**		
	GBSS	0.53*	0.32	0.63**	0.54*	0.79**	
	SBE	0.61**	0.27	0.50*	0.60**	0.85**	0.66**
	SSS	0.70**	0.16	0.49*	0.53*	0.74**	0.70**

2.4 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦产量构成的影响

如图 7~10 所示,不同氮肥基追比条件下宁春 4 号和宁春 47 号的穗粒数、穗粒重、千粒重和生物产量都不相同。常温 T1 条件下,各氮肥基追比间相比较可以看出,氮肥追施比 N1、N2 的春小麦千粒重和每株生物产量都明显高于其它处理,比如宁春 4 号穗粒数 T1N2 > T1N1 > T1N3 > T1N4 > T1N5,穗粒重 T1N2 > T1N4 > T1N3 > T1N1 > T1N5,千粒重 T1N2 > T1N4 > T1N1 > T1N3 > T1N5,生物产量 T1N2 >

T1N4 > T1N3 > T1N1 = T1N5; 宁春 47 号穗粒数 T1N2 > T1N3 > T1N1 > T1N5 > T1N4,穗粒重 T1N1 > T1N2 > T1N3 > T1N4 > T1N5,千粒重 T1N1 > T1N2 > T1N4 > T1N3 > T1N5,生物产量 T1N1 > T1N2 > T1N4 > T1N3 > T1N5。高温胁迫 T2 下,两品种的穗粒数、穗粒重、千粒重和生物产量均低于常温 T1 条件下,比如宁春 4 号 T2N2 的穗粒数降低的比率较 T2N1、T2N3、T2N4、T2N5 分别减少了 5.03%、0.16%、15.37%、11.77%,T2N2 的千粒重较 T2N1、T2N3 减少了 15.37%、3.87%;宁春 47 号 T2N1 穗粒数较

T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 分别减少了 2.52%、20.48%、8.18%、30.08%，T2N2 穗粒重较 T2N1、T2N5 减少了 12.34%、8.17%，T2N1 千粒重较 T2N2、T2N3、T2N4、T2N5 减少了 6.97%、6.48%、16.24%、27.83%，T2N2 生物产量较 T1N1、T2N5 减少了

19.03%、57.89%。由此看出，宁春 4 号和宁春 47 号产量构成的变化规律基本一致，仅个别处理存在差异。综合来说，合理的氮肥基追比(3:7 和 4:6)对缓解灌浆期高温胁迫对产量的影响效果显著。

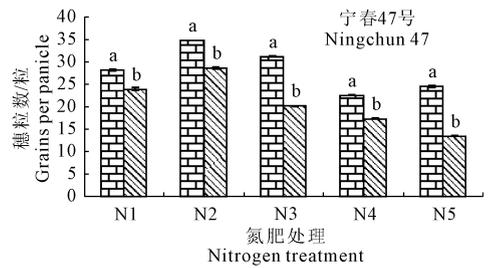
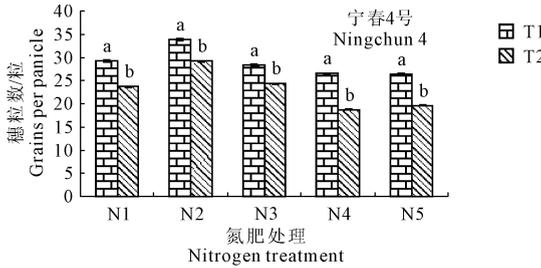


图 7 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦穗粒数的影响

Fig.7 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the gains per panicle

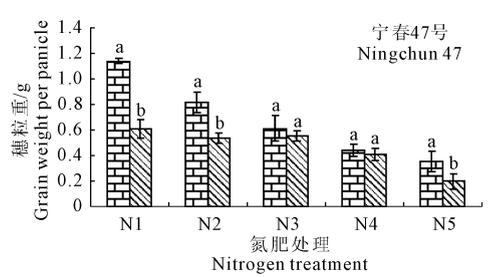
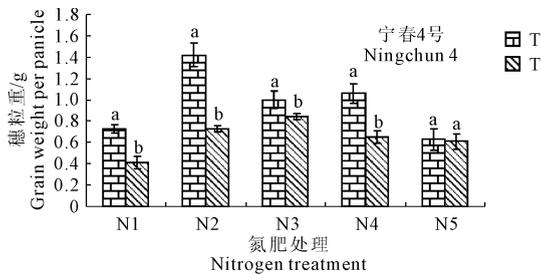


图 8 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦穗粒重的影响

Fig.8 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the gain weight per panicle

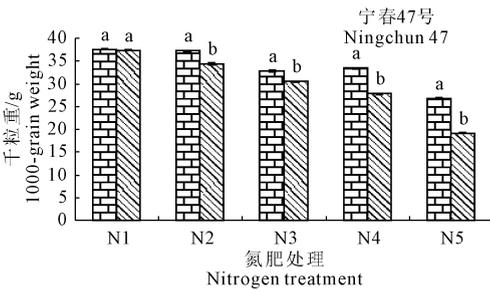
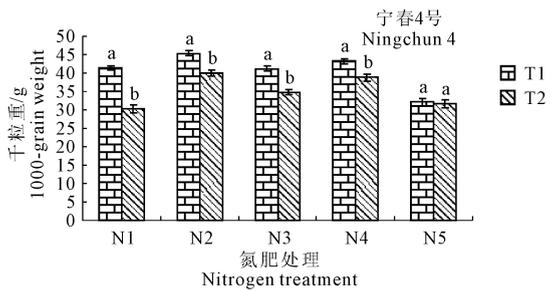


图 9 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦千粒重的影响

Fig.9 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the gain weight

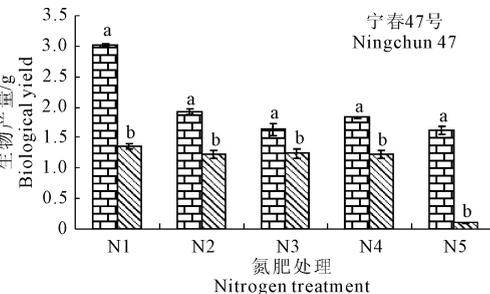
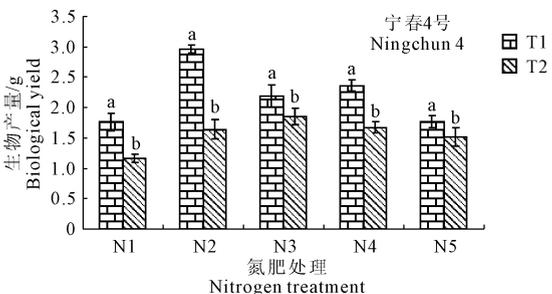


图 10 氮肥基追比对高温胁迫下春小麦生物产量的影响

Fig.10 Effect of nitrogen dressing ratios and high temperature stress on the biological yield

3 讨论与结论

在西北地区春小麦籽粒发育过程中,温度超过30℃极易形成干热风天气,这给小麦正常生长发育带来极大的障碍。研究表明,小麦灌浆过程中的直链、支链和总淀粉含量呈现增长趋势,且前期增长慢后期增长速度快,生育期间小麦的籽粒淀粉含量都呈现出“S”型曲线,前期上升速度慢,花后10 d开始上升幅度加快,30 d至成熟期上升幅度趋于减缓,成熟期淀粉含量达到峰值^[12]。有试验结果表明,灌浆期遇到高于30℃的天气会使小麦的直链淀粉含量增加^[13]。而赵辉等^[4]认为过高的温度对直链淀粉影响比较显著,而支链淀粉含量增加不明显,导致支/直比例迅速下降。而关于氮肥基追比与高温胁迫互作对小麦淀粉含量的影响研究相对较少。本试验结果表明,灌浆期高温条件下,各处理淀粉含量均呈现“S”变化趋势,宁春4号与宁春47号对高温胁迫反应变化趋势基本一致,氮肥基追比对于减轻高温胁迫给淀粉含量造成的影响并不明显,高温与氮肥互作下直链、支链、总淀粉含量均低于常温下的含量,说明高温加快了籽粒灌浆速度,灌浆时间减短,导致淀粉含量降低。大多数试验表明,小麦花后高温胁迫显著降低了籽粒直链及支链淀粉含量^[14],这与本研究结果一致。在籽粒发育过程中,直链淀粉与总淀粉含量的高低与ADPG-PPase、SSS活性紧密相关^[1],直链淀粉积累速率与GBSS活性呈正相关关系,SSS活性较高、GBSS活性较低的品种往往直/支比淀粉较高^[15]。有研究表明,小麦生育后期灌浆速率降低的主要原因是温度过高抑制了淀粉形成关键酶的合成,而SSS对高温尤为敏感^[16]。灌浆期高温胁迫对GBSS活性的影响要比对SSS、AGPP活性的影响小^[12],并通过对SSS的抑制使支链淀粉含量降低,但高温对GBSS活性的影响不明显^[4],本研究与前人研究结果一致,即五种淀粉形成关键酶活性随生育期的推进呈现逐渐下降的趋势,高温胁迫降低了淀粉形成关键酶活性,宁春4号与宁春47号变化趋势基本一致。氮肥基追比对小麦籽粒产量及产量构成要素的影响,与前人研究结果不一致。王立秋等^[17]认为,生育后期增施氮肥对提高小麦产量的效果不明显,也有研究表明,适当增施后移氮肥,能够增强小麦分蘖能力,增加小麦穗数、穗粒数以及粒重,使籽粒产量明显提高^[18]。本研究表明,在高温胁迫条件下,N1(3:7)和N2(4:6)的氮肥基追比可以获得较高籽粒产量水平。两个品种中,氮肥基追

比为N1(3:7)和N2(4:6)的直链淀粉含量、AGPP-PPase、GBSS活性和产量等均优于氮肥基追比为N3(5:5)、N4(7:3)、N5(6:4)的各处理。因此,合理的氮肥基追比(3:7和4:6)能提高春小麦淀粉品质和春小麦产量,并减轻高温胁迫对春小麦籽粒中后期灌浆的影响。

参考文献:

- [1] Jenner C F, Denyer K, Guerin J. Thermal characteristic of soluble starch synthase from wheat endosperm[J]. *Aust. J. Plant Physiol.* 1991,22:703-709.
- [2] Blumenthal C S, bekas F, Gras P W, et al. Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality[J]. *Cereal Chem.* 1994,75:539-544.
- [3] 李永庚,于振文,张秀杰,等.小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. *植物生态学报*,2005,29(3):461-466.
- [4] 赵辉,戴延波,荆奇,等.灌浆期高温对两种品质类型小麦品种籽粒淀粉合成关键酶活性的影响[J]. *作物学报*,2006,32(3):423-429.
- [5] 王珏,封超年,郭文善,等.花后高温胁迫对小麦籽粒淀粉积累及晶体特性的影响[J]. *麦类作物学报*,2008,28.
- [6] 杜世州,曹承富,张耀兰,等.氮肥基追比例对淮北地区超高产小麦产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*,2009,29(6):1027-1033.
- [7] 赵广才,李春喜,张保明,等.不同施氮比例和时期对冬小麦氮素利用的影响[J]. *华北农学报*,2000,15(3):99-102.
- [8] 赵晶晶.花后高温胁迫下不同施氮量对春小麦产量形成的影响研究[D].宁夏大学,2015.
- [9] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2007:159-165.
- [10] 李玲.植物生理学模块实验指导[M].北京:科学出版社,2009.
- [11] 徐如强,孙其信,张树接.小麦耐热性研究现状与展望[J]. *中国农业大学学报*,1998,3(3):33-40.
- [12] 刘萍,郭文善,浦汉春,等.灌浆期短暂高温对小麦淀粉形成的影响[J]. *作物学报*,2006,32(2):182-18.
- [13] Panozzo J F, Eagles H A. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat: I. Starch[J]. *Aust J Agric Res.* 1998,49:757-766.
- [14] 方克旋,王澄.小麦直链淀粉含量测定及其含量对食品品质的影响[J]. *中国粮油食品*,1985,2:27-28.
- [15] He Z H, Rajaram S. Differential responses of bread wheat characters to high temperature[J]. *Euphytica.* 1994,72(3):197-203.
- [16] Keeling P L, Bacon P J, Holt D C. Elevated temperature reduced starch deposition in wheat endosperm by reducing the activity of soluble starch synthase[J]. *Planta.* 1993,191(3):342-348.
- [17] 王立秋,靳占忠,曹敬山.氮肥不同追肥比例和时期对春小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*,1996,(6):45-4.
- [18] 徐恒永,赵振东,刘爱锋,等.氮肥对优质专用小麦产量和品质的影响[J]. *山东农业科学*,2001,2:13-17.