

多效唑对高粱生长发育及生理的影响

魏世林, 杨溥原, 梁红凯, 殷丛培, 任根增, 高玉坤, 崔江慧*, 常金华*

(河北农业大学农学院, 河北 保定 071000)

摘要: 为了解喷施多效唑对高粱(*Sorghum bicolor*)生长发育和生理的影响, 在高粱品种‘农大红 1 号’拔节期喷施多效唑水溶液, 对高粱的生长发育和生理指标进行了研究。结果表明, 喷施不同浓度的多效唑后, 高粱株高均比对照降低, 基部节间长度缩短, 茎粗增加, 且穗粒重也提高。同时, 高粱叶片的叶绿素含量和净光合速率提高, 且抗氧化酶活性提高并降低了丙二醛含量。因此喷施多效唑可提高高粱的抗倒伏性, 延缓叶片衰老, 提高产量。在大田生产中, 以拔节期喷施 450~600 mg/L 多效唑的效果较好。

关键词: 多效唑; 拔节期; 生长发育; 生理

doi: 10.11926/jtsb.4279

Effects of Paclobutrazol on Growth and Physiology Characters of Sorghum

WEI Shi-lin, YANG Pu-yuan, LIANG Hong-kai, YIN Cong-pei, REN Gen-zeng, GAO Yu-kun, CUI Jiang-hui*, CHANG Jin-hua*

(Agricultural College of Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: In order to understand the effect of paclobutrazol on growth and physiology characters of sorghum (*Sorghum bicolor*), the variety ‘Nongdahong 1’ was sprayed different concentration paclobutrazol solution at jointing stage, the growth and physiological indexes were studied. The results showed that compared with the control, the plant height and basal internode length of sorghum decreased after sprayed paclobutrazol, and the stem diameter and ear grain weight increased. Therefore, paclobutrazol treatments could improve the lodging resistance of sorghum. Meanwhile, the chlorophyll content and net photosynthetic rate of leaves increased as well as the antioxidant enzyme activities, and the MDA content reduced. Therefore, spraying paclobutrazol could improve lodging resistance, delay leaf senescence and increase yield of sorghum. In the field production, spraying 450–600 mg/L at jointing stage was more effective.

Key words: Paclobutrazol; Jointing stage; Growth and development; Physiology

植物生长调节剂可以通过降低植株株高和重心、增加茎粗和茎秆韧性来提高抗倒伏性; 同时植物生长调节剂还具有促进植物分蘖和花芽分化、增加抗逆性、提高产量等作用^[1-2]。目前市场上常见的植物生长调节剂有乙烯利、矮壮素、烯效唑和多效唑等^[3]。

多效唑(PP333), 又称氯丁唑, 属于三唑类化控剂, 分子式为 $C_{15}H_2OClN_3O$, 是一种高效的生长延

缓剂。多效唑通过降低植物体内源赤霉素含量抑制营养生长, 从而达到矮化的效果^[4-5], 还可通过提高植株吲哚乙酸(IAA)氧化酶的活性, 降低内源 IAA 水平^[6]。目前, 已有与多效唑相似作用的植物生长调节剂的报道, Yan 等^[7]的研究表明喷施烯效唑能有效抑制大豆(*Glycine max*)过度生长, 延迟叶片衰老, 提高叶片的叶绿素含量及增强光合作用; 霍秀

收稿日期: 2020-06-30 接受日期: 2020-09-04

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19226370D)资助

This work was supported by the Planning Project for Key Research and Development of Hebei (Grant No. 19226370D).

作者简介: 魏世林, 男, 硕士研究生, 从事作物研究。E-mail: 1970378107@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cjianghui521@126.com, jhchang2006@126.com

爱^[8]的研究表明喷施化控剂能够降低玉米(*Zea mays*)株高, 增加茎粗, 提高抗倒伏性, 并且提高叶片抗氧化酶活性和降低丙二醛含量; Liu 等^[9]的研究表明, 喷施烯效唑可以降低甜高粱(*Sorghum dochna*)株高, 增加茎粗, 提高抗倒伏性。多效唑处理毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)和甘薯(*Dioscorea esculenta*)后, 叶片叶绿素含量和净光合速率提高, 且 SOD、POD 活性提高, MDA 含量降低, 提高了植株抗逆性, 有利于干物质积累^[10-11]。有研究表明^[12-16], 在高粱拔节期采取一定措施可以有效防止倒伏。

高粱(*Sorghum bicolor*)为禾本科(Gramineae)高粱属作物, 是世界第五大粮食作物, 在粮食生产上具有重要地位^[17-18]。高粱抗逆性强, 适应性广, 且籽粒和秸秆有多种用途^[1,19]。近年来, 随着国际局势变化, 高粱价格不断上升, 高粱种植面积逐渐扩大, 但栽培经验不足, 由于高粱在生长中后期易发生倒伏, 影响高粱的产量和品质, 成为限制高粱生产的重要因素之一。目前提高高粱抗倒伏主要有选育抗倒伏品种、改善栽培措施和药剂处理等方法, 但有关植物生长调节剂对高粱生长发育和生理影响机理的研究较少。本试验在高粱拔节期喷施不同浓度的多效唑, 对其生长发育和生理的调控效应进行分析, 并筛选出适宜的喷施浓度, 以期为高粱大田生产提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为河北农业大学育成的高产、优质、多抗的酿造用高粱(*Sorghum bicolor*)品种‘农大红 1 号’, 株高 190 cm, 全生育期 107 d。多效唑为盐城利民农化有限公司生产的可湿性粉剂, 有效成分含量为 15%。

1.2 试验设计

田间试验于 2018 年在河北农业大学试验农场进行, 土壤为棕壤土, 肥力均匀。于 2018 年 5 月 20 日播种, 随机区组设计, 3 次重复。多效唑设置 5 个浓度, 分别为 0 (清水, 对照)、300、450、600 和 900 mg/L。于拔节期(七叶期, 2018 年 6 月 24 日)按 66.7 mL/m² 均匀喷施整株叶面 1 次, 分别于 8 叶期(6 月 27 日)、9 叶期(6 月 30 日)、10 叶期(7 月 2 日)、11 叶期(7 月 5 日)和 12 叶期(7 月 9 日)和收获

期(9 月 4 日)取样。

1.3 方法

株高 测量高粱地上部分的高度, 并记录开花期和成熟期; 测量第三节中间部位的直径为高粱茎粗和地上第 3 节的节长; 收获后测量穗重、穗粒重和千粒重。利用瑞典波通公司近红外谷物分析仪测量籽粒蛋白质、脂肪、淀粉和单宁含量(%)。

叶绿素含量的测量 于上午 9:00-11:00, 利用叶绿素仪 SPAD-502 测量高粱最上部第 1 片展开叶中部的边缘和中间部位的叶绿素含量, 以 SPAD 值表示, 测量环境光强为 579.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 温度 25℃, 田间 CO₂ 浓度 415.5 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 重复 3 次, 取平均值。

净光合速率的测量 于晴朗天气的上午 9:00-11:00, 利用 Li-6400XT 光合仪测量最上部展开叶的净光合速率, 测量环境光强为 579.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 温度 25℃, CO₂ 浓度 415.5 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 重复 3 次, 取平均值。

生理生化指标的测定 采集最上部第 1 片展开叶, 经液氮速冻, 于 -80℃ 储存。称取 0.5 g 叶片(去叶脉)于预冷的研钵中, 加入 2 mL 预冷的 pH7.8 磷酸缓冲液研磨成浆后转入 10 mL 离心管中, 用磷酸缓冲液冲洗研钵, 转入离心管中, 加磷酸缓冲液至 8 mL, 于 4℃, 8 000×g 离心 10 min, 取上清液, 即为粗酶液^[20], 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法^[21], 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[22], 丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法(TBA)^[23]。

1.4 数据处理

采用 Office 2016、SPSS 21.0 对数据进行统计分析, 采用多重比较对数据进行显著性分析, 以 Person 相关系数表示数据间的相关性。

2 结果和分析

2.1 多效唑处理对高粱生长发育的调控

经多效唑喷施处理的高粱株高均显著低于对照, 且不同浓度间的差异显著(表 1)。随多效唑浓度升高, 株高呈降低的趋势。收获期喷施不同浓度多效唑间的株高差异显著, 分别比对照降低了 3.6%、7.2%、9.7% 和 12%。这说明多效唑可以显著降低株高, 且随浓度升高, 对株高的抑制作用增强。

结果表明(表 1),多效唑对基部节长和茎粗的影响显著。茎粗随多效唑浓度升高而增加,当多效唑浓度大于 600 mg/L 时,茎秆增粗效应趋于平缓;基部节长随着多效唑浓度升高缩短,当浓度高于 450 mg/L 时的节长差异不显著。因此,适宜浓度的多效唑可以有效增加茎粗和缩短基部节长。

多效唑对高粱开花期也有一定的影响(表 1),从播种至开花所需时间随多效唑浓度增加而延长,分别为 65、66、67、70 和 73 d。

高粱籽粒品质反映在蛋白质、脂肪、淀粉和单

宁含量上。从表 2 可见,多效唑对籽粒蛋白质、脂肪和淀粉含量的影响显著,均随多效唑浓度增加而增加;当多效唑浓度大于 300 mg/L 时,高粱籽粒的淀粉含量降低;但多效唑对单宁含量无显著影响。

多效唑能显著提高高粱产量,喷施不同浓度的多效唑,高粱产量表现为 600 mg/L>450 mg/L>300 mg/L>900 mg/L>0 mg/L;千粒重随着多效唑浓度升高有所降低,说明多效唑处理增加了穗粒数。整体而言,当多效唑浓度为 450~600 mg/L 时,对产量提升效果最佳(表 2)。

表 1 多效唑对高粱生长的影响

Table 1 Effect of paclobutrazol on growth of sorghum

多效唑 Paclobutrazol (mg/L)	株高 Height (cm)						节长 Node length (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	开花期 Flowering days
	8 叶期 8-leaf stage	9 叶期 9-leaf stage	10 叶期 10-leaf stage	11 叶期 11-leaf stage	12 叶期 12-leaf stage	收获期 Harvest stage			
0	38.3±2.4a	94.3±7.2a	106.3±9.3a	111.5±9.0a	126.3±9.1a	202.7±6.2a	11.07±0.53a	1.16±0.08d	65
300	38.6±4.1a	87.0±6.1b	98.4±5.8b	102.3±6.8b	120.2±7.0b	195.4±4.0b	9.60±0.53b	1.26±0.04c	66
450	36.3±3.6a	77.7±4.8c	85.5±5.2c	88.8±2.3c	102.9±5.4c	188.1±5.5c	6.11±0.13c	1.34±0.03b	67
600	36.4±4.6a	79.5±3.9c	86.3±6.9c	90.4±6.9c	103.8±5.7c	183.2±4.1d	6.33±0.21c	1.39±0.03a	70
900	34.8±2.1a	75.1±3.2c	77.3±3.2d	81.1±4.6d	94.7±6.5d	178.3±4.5e	6.07±0.20c	1.41±0.02a	77

同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Tables.

表 2 不同浓度多效唑对高粱籽粒品质和产量的影响

Table 2 Effect of paclobutrazol on grain quality and yield of sorghum

多效唑 Paclobutrazol (mg/L)	蛋白质含量 Protein content /%	脂肪含量 Fat content /%	淀粉含量 Starch content /%	单宁含量 Tannon content /%	穗重 (g) Panicle weight	穗粒重 (g) Panicle grain weight	千粒重 (g) 1000-grain weight
0	7.60±0.22d	4.95±0.25d	72.49±1.75a	1.93±0.10b	18.58±3.23d	15.74±3.97d	32.29±4.98a
300	8.12±0.54c	4.49±0.36c	72.79±1.12a	2.04±0.13a	23.11±2.62b	20.74±3.76b	29.39±1.29b
450	8.31±0.12bc	4.83±0.34bc	69.60±2.28b	2.05±0.08a	25.45±3.41a	20.85±1.35a	28.62±1.06c
600	8.44±0.25ab	5.12±0.66b	69.66±1.91b	2.09±0.04a	25.86±3.15a	21.58±3.5a	28.65±1.97c
900	8.67±0.17a	5.69±0.49a	70.32±2.52b	2.11±0.06a	21.32±2.75c	18.29±1.29c	28.37±2.21cd

相关性分析(表 3)表明,株高和节长与千粒重呈显著正相关,与脂肪含量呈显著负相关,而茎粗则相反;穗粒重与单宁含量呈显著负相关;千粒重与脂肪含量呈显著负相关。

2.2 多效唑对生理生化指标的影响

从表 4 可见,经多效唑喷施处理,除 8 叶期外,9~12 叶期高粱叶片的叶绿素含量均高于对照,且随多效唑浓度升高而升高。随生长发育进程,叶片的叶绿素含量呈上升趋势。拔节期喷施多效唑能够显著提高高粱叶片的净光合速率,且随多效唑浓度增加而提高,这说明多效唑能提高高粱的光合能力。

从表 5 可见,经多效唑喷施处理,不同发育时期的高粱叶片 SOD 活性均高于对照,且随多效唑浓度升高而升高。随生长发育进程,叶片 SOD 活性总体呈现先上升后下降再缓慢上升的变化趋势,10 叶期的 SOD 活性降到最低,随后又升高。多效唑处理的高粱叶片 POD 活性均高于对照,且随多效唑浓度升高而升高。8~9 叶期的 POD 活性下降速率均高于对照,9~11 叶期的 POD 活性相对稳定,11~12 叶期又快速上升。多效唑可以降低高粱叶片中 MDA 含量,8~11 叶期的 MDA 含量均下降。10 叶期的叶片 MDA 含量均低于对照。随多效唑浓度升高,MDA 含量呈下降的趋势。10~11 叶期,除

表 3 高粱农艺性状间的相关性

Table 3 Relation coefficient among agronomic traits of sorghum

农艺性状 Agronomic trait	株高 Height	节长 Node length	茎粗 Stem diameter	穗重 Panicle weight	穗粒重 Panicle grain weight	千粒重 1000-grain weight	蛋白质含量 Protein content	脂肪含量 Fat content	淀粉含量 Starch content	单宁含量 Tannins content
株高 Height	1									
节长 Node length	0.899*	1								
茎粗 Stem diameter	-0.987**	-0.941*	1							
穗重 Panicle weight	-0.514	-0.686	0.639	1						
穗粒重 Panicle grain weight	-0.480	-0.587	0.593	0.961**	1					
千粒重 1000-grain weight	0.884*	0.909*	-0.928*	-0.767	-0.779	1				
蛋白质含量 Protein content	0.001	-0.367	0.107	0.505	0.494	-0.398	1			
脂肪含量 Fat content	-0.976**	-0.932*	0.963**	0.462	0.417	-0.884*	0.139	1		
淀粉含量 Starch content	0.778	0.914*	-0.835	-0.677	-0.495	0.713	-0.208	-0.776	1	
单宁含量 Tannins content	0.286	0.514	-0.427	-0.936**	-0.839*	0.514	-0.429	-0.220	0.641	1

**：P<0.01；*：P<0.05.

表 4 多效唑对高粱叶片叶绿素含量和净光合速率的影响

Table 4 Effect of paclobutrazol on chlorophyll content and net photosynthetic rate of sorghum

	多效唑 (mg/L) Paclobutrazol	8 叶期 8-leaf stage	9 叶期 9-leaf stage	10 叶期 10-leaf stage	11 叶期 11-leaf stage	12 叶期 12-leaf stage
叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD)	0	34.67±0.52a	38.36±1.86c	39.57±1.43b	42.76±2.32b	44.45±0.78c
	300	37.21±1.84a	39.96±1.69bc	42.15±2.25ab	43.69±2.41b	44.98±3.29bc
	450	36.01±1.42a	41.72±1.85ab	43.33±2.45ab	44.98±1.90b	46.31±0.39bc
	600	35.12±1.15a	42.49±1.00ab	43.65±2.09a	46.15±2.11ab	48.07±1.83b
	900	34.54±2.23a	43.66±1.19a	44.42±2.15a	48.55±0.68a	54.69±1.36a
净光合速率 Net photosynthetic rate [μmol/(m ² ·s)]	0	13.60±1.82b	17.70±0.44e	19.53±0.34e	21.71±0.62d	24.42±0.07d
	300	16.15±0.41a	22.76±0.49d	25.63±1.35d	26.72±0.68c	31.58±0.40c
	450	16.56±0.50a	26.15±0.16c	28.31±0.75c	30.75±0.53b	32.30±0.86c
	600	15.65±0.43a	29.01±0.82b	32.01±0.60b	34.94±0.30a	37.11±0.72b
	900	17.34±0.63a	32.13±0.36a	35.19±0.29a	36.98±0.29a	40.55±0.75a

表 5 多效唑对高粱 SOD、POD 活性和 MDA 含量的影响

Table 5 Effect of paclobutrazol on SOD, POD activities and MDA content of sorghum

	多效唑 (mg/L) Paclobutrazol	8 叶期 8-leaf stage	9 叶期 9-leaf stage	10 叶期 10-leaf stage	11 叶期 11-leaf stage	12 叶期 12-leaf stage
SOD (U/g)	0	501.25±4.10ab	607.56±24.99b	328.07±31.59b	364.18±23.42b	370.16±39.06b
	300	494.78±16.79ab	624.36±31.00ab	338.81±19.93ab	381.70±51.23ab	400.15±32.41b
	450	542.18±54.46a	645.04±35.55ab	378.94±32.98ab	402.15±35.23ab	452.75±43.94ab
	600	534.10±30.39a	677.93±35.68a	390.10±29.81ab	429.37±25.16ab	453.66±43.98ab
	900	471.51±33.89b	681.43±39.21a	403.47±46.96a	449.10±41.91a	511.95±58.89a
POD (U/g)	0	1 873.66±73.15d	1 026.30±45.02c	1 199.65±35.83c	897.98±59.55c	2 163.67±90.92c
	300	2 493.41±84.14c	1 204.12±72.27b	1 200.67±103.72bc	998.90±87.81abc	2 368.28±162.06bc
	450	2 665.26±70.72bc	1 224.61±75.50b	1 346.91±107.73b	1 242.14±94.56ab	2 546.89±127.22ab
	600	2 730.66±117.02 ab	1 267.78±53.61b	1 390.54±94.97ab	1 120.82±77.06abc	2 178.99±147.33c
	900	2 930.38±150.34a	1 506.51±80.92a	1 638.32±117.04a	1 300.78±99.27a	2 741.76±72.27a
MDA (μmol/L)	0	5.22±0.26a	4.08±0.63a	3.99±0.30a	3.14±0.32a	3.41±0.52a
	300	4.17±0.26b	4.00±0.33a	3.16±0.18b	2.65±0.33b	3.00±0.34b
	450	5.55±0.32a	4.10±0.15a	2.88±0.33bc	2.44±0.24bc	2.98±0.22b
	600	4.11±0.48b	3.71±0.28a	2.76±0.38c	2.18±0.24c	2.62±0.23c
	900	3.72±0.45b	3.64±0.47a	2.60±0.18c	2.08±0.32c	2.46±0.26c

900 mg/L 多效唑处理的 MDA 含量上升外, 其余处理均下降, 且均低于对照。11~12 叶期的 MDA 含量有所上升, 但仍低于对照。

相关性分析(表 6)表明, 抗氧化酶活性与 MDA 含量间呈负相关, 表明多效唑处理可以提高高粱抗氧化酶活性, 清除体内活性氧, 同时减少 MDA 积累。

表 6 抗氧化酶活性及 MDA 含量间的相关性

Table 6 Correlation between antioxidant enzyme activity and MDA content

		SOD					POD					MDA				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SOD	1	1														
	2	0.013	1													
	3	0.082	0.966**	1												
	4	-0.121	0.986**	0.968**	1											
	5	-0.130	0.920*	0.967**	0.961**	1										
POD	1	0.003	0.887*	0.895*	0.895*	0.914*	1									
	2	-0.380	0.862	0.861	0.927*	0.949*	0.905*	1								
	3	-0.315	0.877	0.908*	0.940*	0.959**	0.782	0.930*	1							
	4	0.037	0.809	0.920*	0.850	0.954*	0.890*	0.855	0.862	1						
	5	-0.389	0.458	0.592	0.577	0.763	0.674	0.789	0.728	0.824	1					
MDA	1	0.583	-0.607	-0.425	-0.633	-0.491	-0.561	-0.698	-0.537	-0.249	-0.239	1				
	2	0.350	-0.879*	-0.753	-0.886*	-0.747	-0.682	-0.807	-0.808	-0.519	-0.297	0.858	1			
	3	0.323	-0.876	-0.889*	-0.937*	-0.969**	-0.918*	-0.997**	-0.940*	-0.892*	-0.802	0.647	0.786	1		
	4	-0.155	-0.957*	-0.923*	-0.923*	-0.868	-0.947*	-0.817	-0.748	-0.801	-0.434	0.573	0.772	0.833	1	
	5	-0.076	-0.952*	-0.865	-0.909*	-0.800	-0.884*	-0.785	-0.714	-0.675	-0.302	0.695	0.859	0.789	0.976**	1

** $: P < 0.01$; * $: P < 0.05$. 1: 8 叶期; 2: 9 叶期; 3: 10 叶期; 4: 11 叶期; 5: 12 叶期。
** $: P < 0.01$; * $: P < 0.05$. 1: 8-leaf stage; 2: 9-leaf stage; 3: 10-leaf stage; 4: 11-leaf stage; 5: 12-leaf stage.

3 结论和讨论

高粱株高矮化是由于叶片和叶鞘的伸长受到抑制所致^[24]。多效唑主要通过抑制植物体内赤霉素的合成, 降低体内 GAs 和 IAA 水平, 从而抑制植物顶端分生组织的细胞分裂, 对植物产生缩短节间, 降低高度, 增粗茎秆, 同时提高抗倒伏能力的影响^[25]。有研究表明^[26-27], 植物生长延缓剂降低了玉米和大丽花(*Dahlia pinnata*)株高, 增加了茎粗。本试验喷施多效唑显著降低了高粱株高, 增加茎粗和缩短基部节间长度, 从而增强了茎的支撑力和植株的抗倒伏能力, 随多效唑浓度升高, 对高粱的株高控制效应愈强, 这与前人的研究结果相似。

本研究结果表明, 多效唑处理能够提高高粱叶片叶绿素含量和净光合速率。曾佳师等^[28]认为, 施用植物生长延缓剂能增加单位叶面积的保卫细胞数, 保卫细胞中的叶绿素粒子增多, 光合速率增强, 同时引起呼吸速率增强, 气孔导度增大, 蒸腾速率加快。这说明多效唑可以通过提高高粱叶片叶绿素含量而提高光合速率^[10,29-30]。

Li 等^[31]报道, 多效唑延缓了莲(*Lotus corniculatus*)

的生长发育; 胡小京等^[32]的研究表明 PP₃₃₃ 使白兰花(*Michelia alba*)植株矮化, 开花数增多, 花期延长。本试验结果表明, 多效唑对高粱生长发育有一定的延迟作用, 随多效唑浓度升高, 高粱开花期延迟效应越明显, 比对照延长了 1~9 d。过高浓度处理虽然会显著延迟高粱的花期, 但会影响高粱的正常成熟。

有研究表明, 多效唑能够调整光合产物流向, 促进结实器官的形成^[24]。张远兵等^[33]的研究表明, 多效唑能够增加石竹(*Dianthus chinensis*)的花蕾数; 李振丽^[34]认为, 多效唑处理可以增加小麦(*Triticum aestivum*)植株的干物质积累。本试验表明, 多效唑可显著提高高粱产量, 当多效唑浓度高于 600 mg/L 时的增产效应降低, 可能是由于多效唑浓度过高, 使高粱生育期过于延长, 收获时高粱籽粒灌浆不完全, 千粒重下降。这说明适当浓度的多效唑可有效提高高粱产量, 并且高粱穗粒数有所增加。但多效唑浓度过高会导致高粱生育期过于延迟, 使得增产效应下降。为了不影响下茬作物种植和高粱的正常成熟, 选择适宜浓度的多效唑既可降低高粱株高, 又可提高高粱产量。

多效唑处理影响了高粱籽粒营养物质积累。元

振^[35]的研究表明,多效唑可显著提高小麦籽粒的蛋白质含量。本研究结果表明,多效唑增加了高粱籽粒中蛋白质和脂肪含量,而淀粉含量有所降低,可见多效唑处理在增加产量的同时,对籽粒营养成分也有一定的影响。

SOD、POD 是存在于植株体内的重要抗氧化酶,可以帮助植物清除体内的活性氧;丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的主要产物之一,能加剧质膜的损伤,间接反映了植物的衰老生理和抗性生理^[36]。SOD、POD 活性和 MDA 含量能综合反映植物的抗逆性和对环境的适应能力^[37]。多效唑可以调节内源激素合成,有效调控植物形态和提高抗氧化系统的活性,进而提高植物抗逆性^[38]。王竞红等^[39]对草坪草的研究表明,多效唑处理能显著提高 6 种抗氧化酶活性;黄建昌等^[40]的研究表明,多效唑可有效提高 SOD、POD 活性,显著地降低细胞 H_2O_2 和 MDA 含量。本试验结果表明,多效唑处理提高了高粱叶片 SOD、POD 活性并降低了 MDA 含量。随多效唑浓度的升高,SOD、POD 活性上升,MDA 含量降低,并随生长发育进程而变化,说明不同浓度多效唑处理可以不同程度提高高粱叶片的抗氧化酶活性,减少叶片中 MDA 的积累,延缓叶片衰老,减轻了环境对高粱生长的影响。本试验结果还表明,高粱叶片的抗氧化酶活性与 MDA 含量的变化与生长发育进程相关。拔节末期前植株的营养生长旺盛,体内产生的活性氧含量不断降低,抗氧化酶活性下降;在拔节末期高粱开始逐渐由营养生长转为生殖生长,叶片中活性氧和 MDA 含量上升,叶片开始衰老,而多效唑处理可延缓叶片的衰老。

综上所述,多效唑能有效提高高粱的抗倒伏能力、调节籽粒营养物质积累、提高叶片光合能力、抗氧化酶活性和减少有害物质积累,减轻环境对高粱生长的影响,有利于稳产高产。但浓度过高对株高的抑制效应下降,使高粱生育期过于延长,不能适期收获,对生产造成负面影响,以 450~600 mg/L 的多效唑喷施较适宜。

参考文献

- [1] ZHAO M, SHAO F Y, ZHOU S X, et al. Safety of plant growth regulators to crops and environment [J]. *J Environ Health*, 2007, 24(5): 370–372. doi: 10.3969/j.issn.1001-5914.2007.05.037.
- [2] JIANG W B, MA K, ZHU J H. Effects of paclobutrazol on improving salt tolerance of strawberry [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 1992, 8(4): 13–17. 姜卫兵, 马凯, 朱建华. 多效唑提高草莓耐盐性的效应 [J]. *江苏农业学报*, 1992, 8(4): 13–17.
- [3] GAO L, LIU G D. Advances in application of paclobutrazol to lawn grass [J]. *Chin J Trop Agric*, 2008, 28(4): 98–102. doi: 10.3969/j.issn.1009-2196.2008.04.022. 高玲, 刘国道. 植物生长调节剂——多效唑在草坪草上的应用进展 [J]. *热带农业科学*, 2008, 28(4): 98–102. doi: 10.3969/j.issn.1009-2196.2008.04.022.
- [4] CAO S Y, ZHANG W Y. The effect of paclobutrazol on vegetative growth, flowering, fruiting and yield of peach [J]. *Plant Physiol Commun*, 1992, 28(1): 29–32. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1992.01.007. 曹尚银, 张威远. 多效唑对桃树营养生长和成花结实的效应 [J]. *植物生理学通讯*, 1992, 28(1): 29–32. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1992.01.007.
- [5] CHEN Y M, CHEN Z Q. Field efficacy trial of 15% paclobutrazol wettability powder in regulating rice growth [J]. *New Countryside*, 2017(36): 14–15. doi: 10.3969/j.issn.1674-8409.2017.36.010. 陈艳梅, 陈足青. 15%多效唑可湿性粉剂调节水稻生长田间药效试验 [J]. *新农村*, 2017(36): 14–15. doi: 10.3969/j.issn.1674-8409.2017.36.010.
- [6] WANG X, YAO F D, GAO C W, et al. Effects of MET on IAA-oxidase and endogenous IAA in rice (*Oryza sativa* L.) seedling [J]. *Acta Agric Univ Zhejiang*, 1991, 17(1): 60–64. 王熹, 姚福德, 高成伟, 等. 多效唑对水稻秧苗吲哚乙酸氧化酶及内源吲哚乙酸的影响 [J]. *浙江农业大学学报*, 1991, 17(1): 60–64.
- [7] YAN Y H, WAN Y, LIU W G, et al. Influence of seed treatment with uniconazole powder on soybean growth, photosynthesis, dry matter accumulation after flowering and yield in relay strip intercropping system [J]. *Plant Product Sci*, 2015, 18(3): 295–301. doi: 10.1626/pps.18.295.
- [8] HUO X A. Studies on the molecular genetic mechanism of plant internode-shorten induced by ethephon in maize [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014: 29–32. 霍秀爱. 乙烯利诱导玉米节间缩短的分子遗传机制研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 29–32.
- [9] LIU Y, FANG Y, HUANG M J, et al. Uniconazole-induced starch accumulation in the bioenergy crop duckweed (*Landoltia punctata*): I. Transcriptome analysis of the effects of uniconazole on chlorophyll and endogenous hormone biosynthesis [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2015, 8(1): 57. doi: 10.1186/s13068-015-0246-7.

- [10] YANG L Z. Effects of PP333 on physiological and ecological characteristics of *Phyllostachys edulis* seedlings under drought stress [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2017: 35–37.
杨丽芝. 多效唑对干旱胁迫下毛竹实生苗生理生态学特性的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 35–37
- [11] ZHOU R X, XIAO X, LI Y Y, et al. Study on the effects of paclobutrazol on physiological and biochemical characteristics of two vegetable sweet potato varieties [J]. *Seeds*, 2020, 39(3): 86–91. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2020.03.086.
周日秀, 肖晓, 李焱瑶, 等. 多效唑对两个菜用甘薯品种生理生化特性影响的研究 [J]. *种子*, 2020, 39(3): 86–91. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2020.03.086.
- [12] WU Q P, WANG Y J, JIANG W S, et al. Comparative of sugar yield and nitrogen utilization in tiller removing or remaining of sweet sorghum [J]. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(11): 1950–1958. doi: 10.3724/SP.J.1006.2010.01950.
吴秋平, 王永军, 姜文顺, 等. 甜高粱分蘖去留与糖产量及氮素利用的比较分析 [J]. *作物学报*, 2010, 36(11): 1950–1958. doi: 10.3724/SP.J.1006.2010.01950.
- [13] GUAN Y A, ZHANG H W, YANG Y B, et al. High-yield and high-efficiency cultivation techniques of energy sweet sorghum [J]. *Shandong Agric Sci*, 2008(7): 107–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-4942.2008.07.036.
管延安, 张华文, 杨延兵, 等. 能源甜高粱高产高效栽培技术 [J]. *山东农业科学*, 2008(7): 107–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-4942.2008.07.036.
- [14] KONG X L. Development advantages and high yield cultivation techniques of sweet sorghum [J]. *Bull Agric Sci Technol*, 2010(4): 136–137. doi: 10.3969/j.issn.1000-6400.2010.04.065.
孔祥林. 甜高粱发展优势及高产栽培技术 [J]. *农业科技通讯*, 2010(4): 136–137. doi: 10.3969/j.issn.1000-6400.2010.04.065.
- [15] YANG F L. Studies on high yield and high sugar cultivation technology of sweet sorghum for fuel ethanol in alpine region [J]. *Farm Mach Using Maint*, 2010(1): 110–112. doi: 10.3969/j.issn.1002-2538.2010.01.085.
杨丰力. 高寒地区燃料乙醇原料甜高粱高产高糖栽培技术研究 [J]. *农机使用与维修*, 2010(1): 110–112. doi: 10.3969/j.issn.1002-2538.2010.01.085.
- [16] LU Q S, LIU H S, BI W B, et al. Studies on sorghum stalk lodging and its defense technology [J]. *Liaoning Agric Sci*, 1993(2): 8–11.
卢庆善, 刘河山, 毕文博, 等. 高粱茎秆倒伏及其防御技术的研究 [J]. *辽宁农业科学*, 1993(2): 8–11.
- [17] MEKBIB F. Farmer and formal breeding of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] and the implications for integrated plant breeding [J]. *Euphytica*, 2006, 152(2): 163–176. doi: 10.1007/s10681-006-9191-7.
- [18] KAMRAN M. Effects of paclobutrazol and mepiquat chloride on root growth, photosynthetic characteristics, lodging resistance and yield of maize (*Zea mays* L.) [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2018: 115–132.
KAMRAN M. 多效唑和缩节胺对玉米根系生长、光合特性、抗倒伏性和产量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 115–132.
- [19] TANG S Y, XIE Q. Sorghum: Small crop with big uses [J]. *Biotechnol Bull*, 2019, 35(5): 1.
唐三元, 谢旗. 高粱: 小作物大用途 [J]. *生物技术通报*, 2019, 35(5): 1.
- [20] LIU Z Q, ZHANG S C. Physiology of Plant Resistance [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994: 370–372.
刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 370–372.
- [21] LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164–167.
李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164–167.
- [22] ZOU Q. Experimental Guidance for Plant Physiology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 168–170.
邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 168–170.
- [23] GAO J F. Experimental Guidance for Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 210–211.
高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210–211.
- [24] LIU B R, MEI C S, ZHANG J Y, et al. Inhibitive effect of PPP333 on growth of various crops [J]. *Plant Physiol Commun*, 1986(4): 43–45. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1986.04.012.
刘宝仁, 梅传生, 张金渝, 等. PP333 对多种农作物延缓生长的效应 [J]. *植物生理学通讯*, 1986(4): 43–45. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1986.04.012.
- [25] ZHOU X L. The dwarfing effects of paclobutrazol and uniconazole on *Chlorophytum capense* 'Vittatum' [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 45–46.
周秀琳. 多效唑和烯效唑对金边吊兰的矮化效应研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 45–46.
- [26] KE J H, LI Z G, YANG H, et al. The study on the effect of plant growth regulators on maize development traits [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 28(33): 40–43. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.33.008.
柯剑鸿, 李正国, 杨华, 等. 植物生长调节剂对玉米生长特性的效应研究 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(33): 40–43. doi: 10.3969/j.issn.

- 1000-6850.2012.33.008.
- [27] KHAN F U, TEWARI G N. Effect of growth regulators on growth and flowering of dahlia (*Dahlia variabilis* L.) [J]. Ind J Hort, 2003, 60(2): 192–194.
- [28] ZENG J S. Regulative effects of plant growth retardants on the growth and development of *Gazania rigens* [D]. Suzhou: Soochow University, 2017: 51–59.
- 曾佳诗. 植物生长延缓剂对勋章菊生长发育的调控作用 [D]. 苏州: 苏州大学, 2017: 51–59.
- [29] CHEN J H, ZHOU H. Influences of abandoned bedding on the growth and drought resistance of two turf grass types [J]. Acta Agres Sin, 2013, 21(4): 744–751.
- 陈俊翰, 周禾. 猪舍废弃垫料对 2 种草坪草生长与耐旱性的影响 [J]. 草地学报, 2013, 21(4): 744–751.
- [30] NING S X, JIANG M. Impacts of paclobutrazol treatment on drought resistance of maize [J]. Liaoning Agric Sci, 1999(2): 12–14.
- 宁淑香, 姜敏. 多效唑处理对玉米植株抗旱能力的影响 [J]. 辽宁农业科学, 1999(2): 12–14.
- [31] LI Q F, HILL M J. Effect of the growth regulator PP333 (paclobutrazol) on plant growth and seed production of *Lotus corniculatus* L. [J]. New Zeal J Agric Res, 1989, 32(4): 507–514. doi: 10.1080/00288233.1989.10417924.
- [32] HU X J, XU Y J, FANG H G, et al. Effect of PP333 and CCC on growth of *Dianthus chinensis* L. [J]. J Mount Agric Biol, 2005, 24(4): 307–310. doi: 10.3969/j.issn.1008-0457.2005.04.006.
- 胡小京, 徐彦军, 方华刚, 等. PP333 和 CCC 对石竹生长发育的影响 [J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(4): 307–310. doi: 10.3969/j.issn.1008-0457.2005.04.006.
- [33] ZHANG Y B, LIU A R, ZHANG X P, et al. Effect of several growth retardants on the florists cineraria growth [J]. Quart For By Prod Special China, 2001(1): 17–18. doi: 10.3969/j.issn.1001-6902.2001.01.013.
- 张远兵, 刘爱荣, 张雪萍, 等. 几种生长延缓剂对瓜叶菊生长发育的影响 [J]. 中国林副特产, 2001(1): 17–18. doi: 10.3969/j.issn.1001-6902.2001.01.013.
- [34] LI Z L. Effects of spacing pattern and chemical control with PP333 on population dynamic and grain yield of winter wheat [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013: 12–14.
- 李振丽. 行距配置和多效唑化控对冬小麦群体生育动态和产量的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2013: 12–14.
- [35] QI Z. Effect of chemical regulation and fertilizer treatment on grain yield and quality of wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 15–16.
- 齐振. 化学调控和肥料处理对小麦产量和品质的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 15–16.
- [36] TIAN Y. The research on the effect of plant inhibitors on the physiology and growth of the *Commelina benahalensis* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017: 19–47.
- 田颖. 植物抑制剂对白花紫露草的生理和生长影响研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017: 19–47.
- [37] JIANG M Y, GUO S C. Oxidative stress and antioxidation induced by water deficiency in plants [J]. Plant Physiol Commun, 1996, 32(2): 144–150. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1996.02.023.
- 蒋明义, 郭绍川. 水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的抗氧化作用 [J]. 植物生理学通讯, 1996, 32(2): 144–150. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1996.02.023.
- [38] FLETCHER R A, GILLEY A, SANKHLA N, et al. Triazoles as plant growth regulators and stress protectants [M]// JANICK J. Horticultural Reviews. Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 2000, 24: 55–138. doi: 10.1002/9780470650776.ch3.
- [39] WANG J H, DUO D. Effect of paclobutrazol on drought resistance of six turfgrass cultivars during the seedling stage [J]. Acta Pratac Sin, 2014, 23(6): 253–258. doi: 10.11686/cyxb20140630.
- 王竞红, 多多. 多效唑对 6 种草坪草苗期抗旱性影响的研究 [J]. 草业学报, 2014, 23(6): 253–258. doi: 10.11686/cyxb20140630.
- [40] HUANG J C, XIAO Y, ZHAO C X, et al. Protective effect of PP333 pro-treatment on physiological reaction to *Chausena lansium* under drought stress [J]. J Fruit Sci, 2004, 21(5): 488–490. doi: 10.3969/j.issn.1009-9980.2004.05.023.
- 黄建昌, 肖艳, 赵春香, 等. 干旱胁迫下 PP333 预处理对黄皮生理反应的影响 [J]. 果树学报, 2004, 21(5): 488–490. doi: 10.3969/j.issn.1009-9980.2004.05.023.