中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):180-189
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026016

高温胁迫下烯效唑对向日葵幼苗表观形态与生理特征的影响

王龙,纪洪亭,王勇,赵韩伟,王艳艳,曾燕楠,程润东,王士红*
(江苏丘陵地区南京农业科学研究所,江苏 南京,210046)

摘要:高温胁迫是抑制植物生长的非生物胁迫之一,烯效唑作为一种良好的植物生长调节剂,具有提升植物抗逆性的潜力。为研究高温胁迫下烯效唑使用对向日葵生长和生理特征的影响,设置常规温度和高温胁迫2个温度水平,烯效唑处理包括对照、4个拌种处理(2.5、5.0、7.5、10.0 g/L)和4个叶面喷施处理(0.5、0.75、1.0、1.5 g/L),共18个处理,测定向日葵幼苗的表观性状以及抗逆生理指标。结果表明,高温胁迫显著降低了幼苗的株高、茎粗和叶面积,同时降低了幼苗干重、根冠比和SPAD,而增加了丙二醛(MDA)含量,表明高温胁迫诱导了氧化损伤,抑制了向日葵幼苗的生长。烯效唑处理可以显著提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性,增强活性氧清除能力,但是,烯效唑浓度过高时会对幼苗产生显著的抑制效应。综上,采用2.5~5.0 g/L浓度的烯效唑拌种或于子叶展平期喷施0.50~0.75 g/L浓度的烯效唑,可在维持幼苗较高生长势的前提下,有效缓解高温胁迫引发的氧化损伤,进而促进壮苗的形成。

关键词:向日葵; 烯效唑; 高温胁迫
中图分类号: S565.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0180-10

Effects of uniconazole application on growth and physiological characteristics of sunflower seedlings under high-temperature stress

WANG Long, JI Hong-ting, WANG Yong, ZHAO Han-wei, WANG Yan-yan, ZENG Yan-nan, CHEN Run-dong, WANG Shi-hong*
(*Nanjing Institute of Agricultural Science in Jiangsu Hilly Area, Nanjing* 210046, *China*)

Abstract: High-temperature stress is one of the major abiotic stresses that inhibit plant growth. To understand uniconazole effects on sunflower growth, experiments are conducted on seedlings' physiological characteristics stressed by high-temperature stress. 2 levels as normal temperature and high-temperature are set, in combination with control and 4 uniconazole seed dressing concentrations (2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 g/L), and 4 uniconazole foliar spraying concentrations (0.5, 0.75, 1.0, and 1.5 g/L). The phenotypic traits and stress-resistant physiological indices of sunflower seedlings were measured. The results showed that high-temperature stress significantly reduced plant height, stem diameter, leaf area, dry weight, root-shoot ratio, and SPAD value of the seedlings, except malondialdehyde content, indicating that high-temperature stress induce oxidative damage and then inhibite seedling growth. Uniconazole application significantly enhances the activities of superoxide dismutase, catalase and peroxidase, thereby improves reactive oxygen species scavenging capacity of seedlings. Nevertheless, excessive high concentration of uniconazole exerts a distinct inhibitory effect on seedlings. In conclusion, seed dressing at concentrations of 2.5-5.0 g/L or foliar spraying at concentrations of 0.50-0.75 g/L at the cotyledon flattening stage could effectively alleviate oxidative damage caused by high-temperature stress while maintaining a relatively high plant growth potential, thus promoting strong seedlings.

Key words: sunflower; uniconazole; high-temperature stress

收稿日期:2026-01-20
基金项目:江苏省省级作物种质资源库(JS-ZW-K17);江苏省农业科技自主创新项目(CX(22)3178)
作者简介:王龙(1996-),男,助理研究员,博士,作物逆境生理栽培,E-mail: 20250043@jaas.ac.cn
* 通讯作者:王士红(1982-),女,副研究员,博士,向日葵栽培生理,E-mail: wshguyu@126.com

向日葵作为重要的油料作物,在我国种植面积广泛,主产区集中于内蒙古、新疆、甘肃等北方区域[1]。目前我国向日葵种植面积保持在67万~80万公顷[2],其产业的稳定发展对保障我国油料安全具有重要意义。此外,向日葵兼具优良的花型与美好的寓意,是极具开发潜力的农业观光作物。近年来,伴随观光休闲农业的快速兴起,向日葵在华东等经济发达地区的种植面积呈逐步扩大的趋势[3]。

向日葵在华东地区可以做到一年两季,第二季的向日葵育苗工作通常安排在8月上旬,这段时间华东区域正值高温天气,日间最高气温普遍能达到38~40℃[4]。高温通常会抑制向日葵苗期植株生长,株高、茎粗、叶面积扩展均受影响。根据前人研究,当环境温度超过36℃时,向日葵生长速率明显下降[5];高温环境下向日葵幼苗叶面积降低,根系生长受到抑制,根长、根表面积和根体积减少[6];过高的温度还会导致茎秆细弱,机械强度降低,使幼苗在移栽中容易损伤,栽后容易死亡[7]。

烯效唑作为一种植物生长调节剂,能有效控制旺长、缩短节间、矮化植株,达到壮苗目的。相关研究显示,烯效唑浸种能有效控制玉米幼苗株高,同时加快出叶速度、增加根茎直径,呈现出良好的壮苗态势[8]。在油菜育苗中,采用烯效唑基质配施[9]或拌种[10]可提高油菜毯苗的出苗率,有效矮化植株、增加干物质积累、降低植株含水量,从而达到壮苗效果。适宜浓度的烯效唑在降低株高的同时,还能有效促进根长增长和侧根条数增多[11]。此外,烯效唑的使用方式对植株生长的影响存在差异,前人研究发现,与浸种和喷施相比,拌种方式能减少烯效唑用量,且效果更为均匀[12]。

除上述壮苗效应外,近年来越来越多的研究表明,烯效唑还可通过调控植物体内多种生理代谢路径,参与植株对高温胁迫的响应,增强植物的耐高温能力。高温胁迫会打破活性氧产生与清除平衡,造成氧化胁迫,而烯效唑可以通过提高植株体内抗氧化酶活性和抗氧化物质含量,减少活性氧积累,如宁万光等[13]研究表明烯效唑可以有效提高高温胁迫下小麦叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,缓解细胞膜损伤,从而增强植株对高温胁迫的耐受性。在光合保护方面,烯效唑可通过减缓高温胁迫下光合色素的降解速度,稳定光系统Ⅱ最大光化学效率等叶绿素荧光参数,保护光合机构免受高温伤害,如在百日草幼苗上的研究表明,适宜浓度的烯效唑能显著减缓高温对光合系统Ⅱ的抑制作用,有效保护光合机构,缓解高温胁迫伤害[14]。同时,烯效唑还可通过调节植物体内激素平衡参与耐高温调控,通过下调赤霉素、生长素含量,上调脱落酸和乙烯等抗逆激素水平,调节植株生长节奏,增强植株对高温胁迫的适应性,这一调控路径在油菜高温胁迫响应中已被初步证实[15]。

基于上述研究,我们推测烯效唑的使用可能有利于向日葵抵抗高温胁迫,缓解高温胁迫对其的伤害,在实现壮苗的同时增强其耐高温能力。因此,本试验开展温度与烯效唑处理的双因素试验,分析烯效唑对向日葵幼苗形态建成和抗逆生理的影响,旨在探明高温环境下向日葵育苗的适宜烯效唑用量和使用方式,为向日葵育苗工作中壮苗培育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

向日葵NX19012由新疆维吾尔自治区农业科学院提供。选用江苏兴农基质科技有限公司生产的育苗基质(总N、P、K≥3%,有机质含量≥35%,pH 5.8~7.0)。盆钵上口径7.5 cm,底径6.5 cm,高7.4 cm,容积260 mL。烯效唑为盐城利民农化有限公司生产的5%有效成分含量的可湿性粉剂。

1.2 试验设计

本试验采用双因素随机区组设计,两个因素分别为温度和烯效唑处理。其中,温度因素设置2个水平,即常规温度(normal temperature,NT)和高温胁迫(high temperature,HT)(表1),温度处理采用动态变化模式,以模拟自然昼夜温度节律。烯效唑处理中以不添加烯效唑为对照,处理组包括烯效唑拌种和叶面喷施两种方式,其中烯效唑拌种有4个浓度梯度:2.5 g/L(S1)、5.0 g/L(S2)、7.5 g/L(S3)、10.0 g/L(S4),叶面喷施同样设置4个浓度梯度:0.5 g/L(F1)、0.75 g/L(F2)、1.0 g/L(F3)、1.5 g/L(F4)(表2)。试验中每个处理设置10盆,重复3次。

具体试验操作方法如下:以5%有效成分的烯效唑粉剂为溶质,以纯水为溶剂,配置对应浓度的烯效唑溶液。拌种时按每15 g种子加入1 mL对应浓度烯效唑溶液的比例混匀;喷施处理于子叶展平期进行,喷施一次,喷施标准为叶面均匀附着水珠且无滴落。试验所用培养箱为浙江省宁波市宁波江南仪器厂生产,试验期间,常规温度和高温胁迫分别在两台相同型号培养箱中同步进行,培养箱内湿度统一设定为65%,夜间升温期为黑夜(11 h),其

他时期为白昼(13 h),光照强度为20 000 lux。另外,于植株前两片真叶展平时喷施千分之一浓度的水溶肥(N-P_2O_5-K_2O为30-10-10),以保证幼苗生长所需营养,水溶肥来自加拿大植物营养产品公司。

1.3 测定指标

1.3.1 形态指标 出苗后培养满15 d进行取样,每个处理取5株,用于测定株高、茎粗、叶面积、干重、根冠比等形态指标。株高为茎基部至叶片最高点长度,茎粗为茎基部到子叶结中间位置的茎直径。

1.3.2 生理指标 同步于形态指标测定,测定一株最上部4片完全展开叶的SPAD值,取平均值作为一个结果,每个处理分别测定3株,测定完SPAD后取同一位置叶片,液氮速冻,以用于测定抗逆生理指标,包括丙二醛(MDA)、过氧化氢(H_2O_2)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)。MDA使用硫代巴比妥酸比色法测定[16],H_2O_2使用钼酸铵法测定[17],SOD活性使用氮蓝四唑光化还原法测定[18],CAT活性使用紫外吸收法测定[19],POD酶活性采用愈创木酚比色法测定[20]。

1.4 数据统计分析

试验数据使用Microsoft Excel进行初步整理,使用SPSS软件进行统计分析。首先对温度(2个水平)和烯效唑处理(含CK共9个水平)进行双因素方差分析,检验温度、烯效唑处理及其交互作用对各指标的影响是否达到显著水平;温度主效应的差异以同一温度下不同烯效唑处理的总体平均值表示,在同一温度水平下,基于LSD法在$p = 0.05$水平上对9个烯效唑处理进行多重比较。采用Pearson相关系数分析不同指标间的线性相关性。使用Origin软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 烯效唑处理对高温胁迫下表观形态的影响

由表3可以看出,高温胁迫显著抑制向日葵幼苗生长,而烯效唑处理具有一定的调控作用。在相同烯效唑处理条件下,高温胁迫显著降低了幼苗株高、茎粗和叶面积。在常温条件下,不同处理的株高、茎粗和叶面积平均值分别为12.50 cm、0.372 mm、79.21 cm^2/株,而在高温条件下上述指标降低至10.63 cm、0.336 mm、60.67 cm^2/株,较常温条件分别降低14.93%、9.46%、23.41%。在同一温度条件下,烯效唑处理显著降低了幼苗株高和叶面积,且抑制效应随烯效唑浓度升高而增强,其中拌种处理以10 g/L(S4)、叶面喷施处理以1.5 g/L(F4)时效果最为显著,较对照分别使株高降低33.03%和43.46%,叶面积降低22.59%和30.81%,可见叶面喷施的调控效应更加强烈。烯效唑处理对幼苗茎

表1 温度处理设计

Table 1 Temperature treatment design

时期Period	时间Time /h	常规温度NT /℃	高温胁迫HT /℃
夜间降温期 Night cooling period	11	20	28
升温期 Temperature rising period	5	27	35
峰值高温期 Peak high-temperature period	4	32	40
恢复期 Recovery period	4	27	35

表2 烯效唑处理设计

Table 2 Uniconazole treatment design /(g/L)

处理 Treatment	拌种 Seed dressing	叶面喷施 Foliar spraying
CK	\	\
S1	2.5	\
S2	5.0	\
S3	7.5	\
S4	10.0	\
F1	\	0.5
F2	\	0.75
F3	\	1.0
F4	\	1.5

注:S:烯效唑拌种处理;F:烯效唑叶面喷施处理

Note: S: uniconazole seed dressing treatment; F: uniconazole foliar spraying treatment

粗的影响具有一定的浓度效应,在拌种浓度2.5~7.5 g/L(S1-S3)和叶面喷施浓度0.50~1.00 g/L(F1-F3)范围内,茎粗与对照无显著差异,部分处理组甚至出现略微升高(不显著),但当浓度进一步升高至S4(10 g/L,拌种)和F4(1.5 g/L,叶面喷施)时茎粗显著降低。此外,在烯效唑不同处理方式间,叶面喷施下幼苗茎粗略低于拌种处理。

2.2 烯效唑处理对高温胁迫下干重、根冠比的影响

从表4可以看出,高温胁迫对向日葵幼苗不同部位干物质积累及根冠比均产生显著影响。在同一烯效唑处理下,高温胁迫显著降低幼苗地下部、地上部及全株干重,同时根冠比也呈显著下降趋势。在常温条件下,幼苗地下部、地上部以及全株干重均值分别为0.148、0.594、0.742 g,而在高温条件下各指标均值分别降低至0.056、0.416、0.472 g,相比较常温,降幅分别达62.19%、30.03%、36.44%,可见地下部干物质积累对高温胁迫的响应更为敏感。与之对应,幼苗根冠比由常温条件下的0.251降至高温胁迫下的0.137。在相同温度条件下,烯效唑处理显著了植株干重,并且抑制效应随着处理浓度增加而增强。其中,拌种处理以10.0 g/L(S4)、叶面喷施处理以1.5 g/L(F4)效果最为强烈,相比较对照,全株干重降幅分别达49.86%和56.43%。然而,烯效唑处理对幼苗根冠比具有正效应,无论是在拌种还是叶面喷施后,根冠比均显著增加。在常温条件下,拌种处理中以5.0~7.5 g/L浓度区间(S2-S3)根冠比达到峰值,叶面喷施处理则在0.75~1.50 g/L浓度区间(F2-F4)根冠比最大;而在高温条件下,拌种处理组根冠比均显著高于对照,以5.0~10.0 g/L浓度区间(S2-S4)最大,叶面喷施处理下以0.75~1.0 g/L浓度区间(F2-F3)根冠比最高,但是当喷施浓度进一步增加至1.5 g/L(F4),根冠比出现降低。

2.3 烯效唑处理对高温胁迫下SPAD的影响

如图1所示,高温胁迫抑制向日葵幼苗叶片SPAD,在常温条件下,不同处理下SPAD平均值为43.4,而高温胁迫下为40.4,相比常温,高温下降低了6.91%。烯效唑处理可以提高叶片SPAD水平,且该效应随着处理浓度的上升而增强,其中拌种处理以10.0 g/L浓度(S4)、叶面喷施处理则在1.50 g/L

表3 不同处理下向日葵幼苗表观性状

Table 3 Morphology of sunflower seedlings under different treatments

温度 Temperature	烯效唑 Uniconazole	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	植株叶面积 Plant leaf area /cm^2
常温NT	CK	17.01 a	0.377 a	95.96 a
	S1	14.83 b	0.379 a	87.34 b
	S2	13.39 c	0.386 a	79.34 c
	S3	12.23 d	0.375 a	76.99 cd
	S4	11.20 e	0.355 b	74.73 de
	F1	13.11 c	0.375 a	85.22 b
	F2	10.62 f	0.375 a	76.29 cd
	F3	10.35 f	0.369 ab	71.39 e
	F4	9.77 g	0.354 b	65.61 f
高温HT	CK	14.39 a	0.346 a	71.60 a
	S1	12.66 b	0.344 ab	67.34 b
	S2	11.40 c	0.349 a	63.14 c
	S3	10.50 d	0.339 abc	57.99 de
	S4	9.83 e	0.328 bcd	54.98 f
	F1	10.66 d	0.347 a	65.84 bc
	F2	9.78 e	0.337 abc	59.26 d
	F3	8.50 f	0.326 cd	55.53 ef
	F4	7.99 g	0.313 d	50.33 g
常温下均值 Average of NT		12.50	0.372	79.21
高温下均值 Average of HT		10.63**	0.336**	60.67**

注:同一列同一温度处理下不同字母表示有显著差异($P<0.05$);**表示常温下均值与高温下均值差异极显著($P<0.01$)。下同

Note: Different letters after data under the same temperature treatment in the same column indicate significance at 0.05 level. **: significance between average NT and average HT at 0.01 level. Same as below

表4 不同处理下向日葵幼苗干重

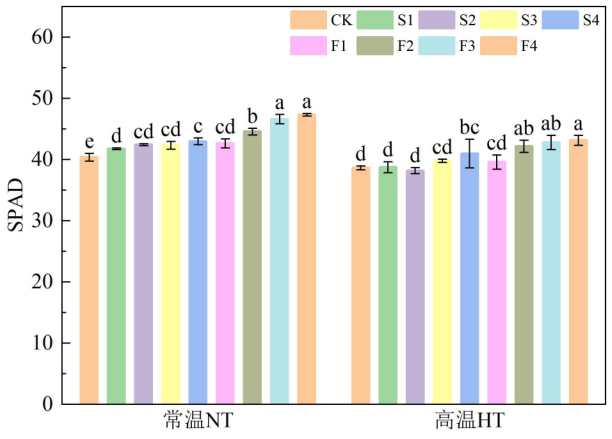
Table 4 Dry weight of sunflower seedling under different treatments

温度 Temperature	烯效唑 Uniconazole	地下部干重 Underground dry weight /g	地上部干重 Aboveground dry weight /g	全株干重 Whole plant dry weight /g	根冠比 Root-shoot ratio
常温 NT	CK	0.234 a	1.016 a	1.250 a	0.231 d
	S1	0.171 b	0.700 b	0.871 b	0.244 c
	S2	0.158 c	0.574 d	0.732 d	0.275 a
	S3	0.149 d	0.561 d	0.710 e	0.266 ab
	S4	0.125 e	0.473 f	0.599 g	0.265 b
	F1	0.145 d	0.625 c	0.770 c	0.232 d
	F2	0.128 e	0.516 e	0.644 f	0.249 c
	F3	0.116 f	0.462 f	0.577 h	0.250 c
	F4	0.106 g	0.422 g	0.528 i	0.250 c
高温 HT	CK	0.074 a	0.653 a	0.727 a	0.113 e
	S1	0.069 b	0.536 b	0.606 b	0.129 d
	S2	0.055 e	0.411 d	0.466 d	0.134 bc
	S3	0.052 f	0.382 e	0.434 e	0.137 b
	S4	0.047 g	0.345 g	0.392 f	0.136 b
	F1	0.061 c	0.456 c	0.517 c	0.135 bc
	F2	0.059 d	0.367 f	0.426 e	0.161 a
	F3	0.048 g	0.299 h	0.347 g	0.159 a
	F4	0.039 h	0.294 h	0.333 g	0.132 cd
常温下均值 Average of NT		0.148	0.594	0.742	0.251
高温下均值 Average of HT		0.056**	0.416**	0.472**	0.137**

浓度(F4)时SPAD达到最大值。两种处理方式间,叶面喷施SPAD明显高于拌种处理,两种方式不同处理下SPAD平均值分别为43.6和40.9。

2.3 烯效唑处理对高温胁迫下抗逆生理的影响

2.3.1 *活性氧* 从表5中可以看出,高温胁迫显著提高了幼苗MDA含量,H_2O_2含量无显著变化。在常温条件下,不同处理的MDA含量平均值为0.717 μg/g,而在高温胁迫下上升至1.119 μg/g,增幅为67.16%。H_2O_2和MDA含量对烯效唑处理的响应在常温和高温胁迫下不同。在常温条件下,相比对照,烯效唑处理显著提高了H_2O_2含量,且增幅随着处理浓度升高而增大;而在高温胁迫下,烯效唑处理后H_2O_2含量显著低于对照,并且随着处理浓度增加呈现出先降后增的趋势,其中拌种处理在5.0 g/L(S2)浓度下、叶面喷施处理在1.0 g/L(F3)浓度下分别达到最低值。对于MDA,在常温条件下,相比对照,低浓度(拌种S1-S2、叶面喷施F1-F2)的烯效唑处理可以降低MDA含量,而高浓度处理下MDA含量高于对照;在高温胁迫下,烯效唑处理可以降低MDA含量,并且随着处理浓度增加同样呈现出先降后增的趋势,拌种处理和叶面喷施处理的最小值分别在7.5 g/L(S3)和1.0 g/L(F3)出现。



注:同一温度下不同字母表示有显著差异(P<0.05)

Note: Different letters under the same temperature treatment indicate significance at 0.05 level. NT: normal temperature; HT: high temperature

图1 不同处理下向日葵幼苗叶片SPAD

Fig. 1 Leaf SPAD of sunflower seedlings under different treatments

2.3.2 *抗氧化酶* 如表6所示,幼苗SOD、CAT和POD活性对高温胁迫的响应存在差异。从总体水平上来看,常温条件下不同处理的SOD和POD活性平均值分别为249.8 U/g和2013.9 U/g,高温胁迫下降低至242.3 U/g和1521.2 U/g,而CAT活性则表现为高温诱导升高,从常温下的199.7 U/g上升至高温

表5 不同处理下向日葵幼苗活性氧含量

Table 5 Reactive oxygen species content of sunflower seedlings under different treatments

温度 Temperature	烯效唑 Uniconazole	过氧化氢 H_2O_2 /(mmol/g)	丙二醛 MDA /(μg/g)
常温NT	CK	0.119 d	0.634 d
	S1	0.120 d	0.550 ef
	S2	0.123 cd	0.527 f
	S3	0.127 bc	0.773 c
	S4	0.131 ab	1.133 a
	F1	0.123 cd	0.520 f
	F2	0.128 bc	0.584 e
	F3	0.134 ab	0.851 b
	F4	0.137 a	0.884 b
高温HT	CK	0.141 a	1.287 ab
	S1	0.129 bcd	1.330 a
	S2	0.124 cd	1.261 bc
	S3	0.126 cd	1.004 e
	S4	0.134 b	1.143 d
	F1	0.131 bc	1.256 bc
	F2	0.126 cd	1.209 c
	F3	0.123 d	1.025 e
	F4	0.128 bcd	1.277 ab
常温下均值 Average of NT		0.127	0.717
高温下均值 Average of HT		0.129	1.199**

胁迫下的245.8 U/g。在相同温度条件下,适宜浓度的烯效唑拌种和叶面喷施均可以提高SOD和CAT活性,但是提升效果随着浓度的增加而减弱,甚至极端高浓度情况下低于对照(如常温条件下1.0 g/L(F4)叶面喷施浓度的SOD活性显著低于对照)。POD活性对烯效唑处理的响应在不同温度下存在差异。在常温条件下,除叶面喷施低浓度处理(F1)外,其余烯效唑处理均可以显著提高POD活性,且效应随着浓度增加而增强,其中拌种处理以10.0 g/L浓度(S4)、叶面喷施处理以1.5 g/L浓度(F4)最佳,与对照相比,两处理下POD活性分别提高了14.41%和47.09%。在高温胁迫下,POD活性对烯效唑处理的响应因处理方式和浓度而异,拌种处理中,低浓度处理(S1-S2)的POD活性与对照没有显著差异,高浓度(S3-S4)则显著提高,叶面喷施处理中,低浓度处理(F1-F2)低于对照,F3与对照没有显著差异,高浓度(F4)则显著高于对照。

2.4 相关分析

图2相关分析结果显示,株高、茎粗、叶面积、干重、根冠比等指标之间呈显著正相关,说明在高温和烯效唑处理下幼苗表观性状协同变化,而MDA与上述指标显著负相关,表明高温环境与高浓度的烯效唑处理造成氧化胁迫,在抗氧化酶中,SOD与表观性状和干重呈正相关,与H_2O_2和MDA呈负相关。

3 讨论

3.1 向日葵幼苗表型对高温胁迫和烯效唑的响应

高温胁迫是影响植物生长发育的重要环境因素。在本研究中,高温胁迫下向日葵幼苗株高、茎粗增长受阻,叶面积扩展受限,干物质积累显著降低。这与前人的研究结果基本一致,Elsayed研究指出,38℃高温处理20 d后,向日葵幼苗活性氧含量大幅升高,光合效率降低,造成植株株高、干重显著降低[21],在玉米[22]、番茄[23]等植物中也观察到类似的现象。茎粗和根冠比通常用来衡量移栽幼苗的强壮程度,在本试验中,茎粗、根冠比在高温胁迫下显著降低,邬雪瑞等[24]同样观察到盐胁迫下向日葵幼苗根冠比显著降低,表明向日葵根系对逆境胁迫更加敏感。适当浓度的烯效唑处理能够在维持较高水平株高、叶面积、干重和茎粗的基础上,有效提高幼苗根冠比,缓解了高温胁迫的抑制效应,从而促进壮苗形成。

3.2 向日葵幼苗生理特征对高温胁迫和烯效唑的响应

逆境胁迫容易打破活性氧平衡,引起活性氧的大量积累,进而诱导细胞膜脂质过氧化损伤[25],破坏叶绿体结构与光合色素合成,同时抑制植株对水分

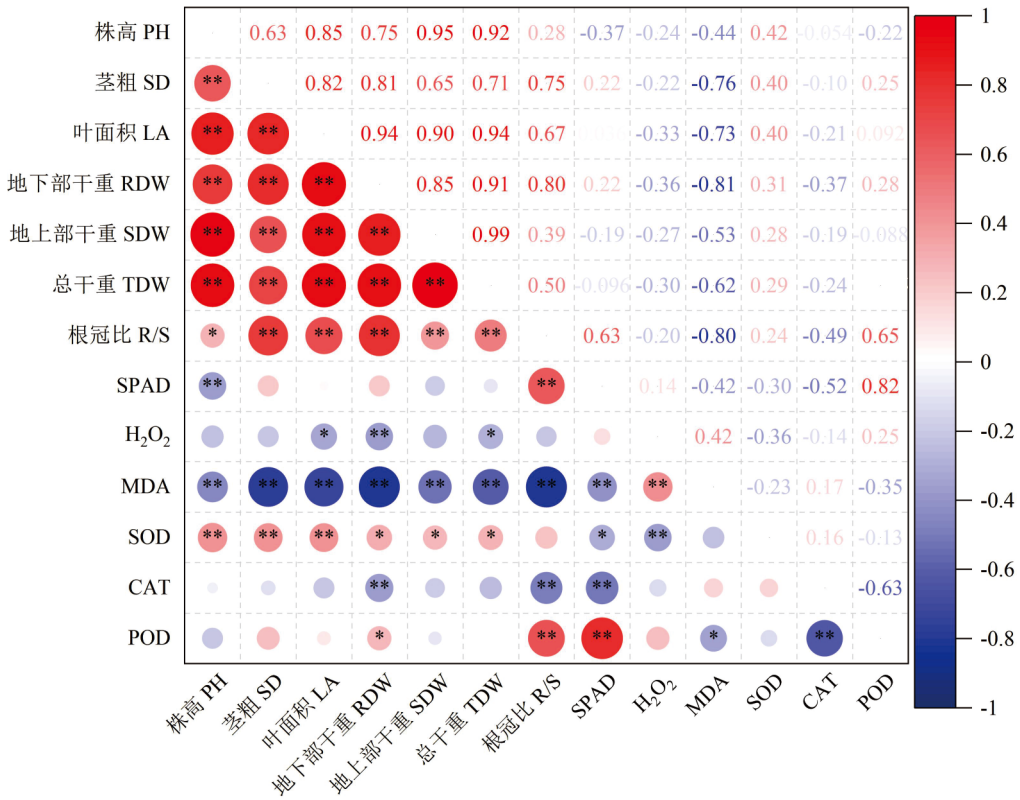
表6 不同处理下向日葵幼苗抗氧化酶活性

Table 6 Antioxidant enzyme activities of sunflower seedlings under different treatments

温度 Temperature	烯效唑 Uniconazole	超氧化物歧化酶 SOD /(U/g)	过氧化氢酶 CAT /(U/g)	过氧化物酶 POD /(U/g)
常温 NT	CK	247.9 bc	165.6 f	1616.5 f
	S1	263.2 a	233.5 b	1792.5 e
	S2	259.1 ab	231.7 b	1895.2 de
	S3	243.2 cd	218.2 c	1929.1 d
	S4	265.8 a	130.2 g	2142.6 c
	F1	256.2 ab	265.3 a	1583.4 f
	F2	239.7 cd	202.9 d	2090.3 c
	F3	240.2 cd	181.6 e	2290.0 b
	F4	232.8 d	168.1 f	2785.0 a
高温 HT	CK	226.2 cd	208.3 e	1418.7 c
	S1	266.1 a	230.7 d	1432.3 c
	S2	263.0 a	282.0 b	1459.4 c
	S3	258.9 a	266.3 c	1604.4 b
	S4	241.7 b	255.0 c	1627.8 b
	F1	240.8 b	340.9 a	1262.1 d
	F2	231.4 bcd	227.1 d	1321.9 d
	F3	232.5 bc	207.1 e	1501.6 c
	F4	220.2 d	194.6 e	2062.3 a
常温下均值 Average of NT		249.8	199.7	2013.9
高温下均值 Average of HT		242.3**	245.8**	1521.2**

和养分的吸收与转运,打破细胞渗透平衡,最终导致植株出现萎蔫等现象[26]。SPAD值反映了叶片的绿色程度,间接反映叶片的叶绿素含量与光合情况,本试验中高温胁迫下向日葵幼苗SPAD值显著降低。这可能是因为高温胁迫抑制了叶绿素合成,如雷毕欣等[27]研究发现高温胁迫显著降低了小麦叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性,减少了植株氮素吸收,从而导致叶绿素合成效率下降;此外,高温会加速叶绿素降解,高温胁迫下类囊体膜的磷脂双分子层结构遭到破坏,完整性丧失,促进叶绿素分子从膜上释放,从而被活性氧分解。在烯效唑处理后向日葵幼苗叶片绿色程度变深,SPAD值显著增加,这种促进效应可能源于烯效唑处理促进了幼苗氮素吸收。万燕等[28]研究指出喷施烯效唑可以促进大豆根系的氮素吸收能力,提高植株氮素吸收水平,从而提高叶绿素合成效率;另一方面,烯效唑处理控制幼苗旺长造成“浓缩效应”,从而导致氮素含量和叶绿素含量相对增加。从SPAD值上来看,烯效唑带来的促进效应随着浓度增加而提高,但是考虑到烯效唑浓度过高会起到严重的抑制作用,因此烯效唑需要保持在适宜范围内。

MDA是植物细胞遇逆境后膜脂过氧化作用的主要产物,故MDA含量的高低可有效反映植株受胁迫损伤程度。本研究中,高温胁迫下,虽然H_2O_2含量未观察到显著提高,但是MDA含量大幅增加,表明高温胁迫对向日葵幼苗造成了氧化胁迫。抗氧化酶是维持植物体内活性氧动态平衡的核心功能组分,其中SOD、CAT和POD可以通过清除逆境条件下过度积累的活性氧,有效缓解氧化胁迫对植物组织的伤害[29]。在本试验中,高温胁迫下向日葵幼苗CAT活性显著增加,而SOD和POD活性则表现为降低。这可能是高温胁迫诱导活性氧大量合成,其积累水平超出幼苗自身抗氧化系统的清除能力,进而造成抗氧化系统功能受损,最终导致SOD与POD活性的降低。在烯效唑处理后,向日葵幼苗POD活性显著升高,且增幅随着烯效唑浓度增加而提高,SOD和CAT活性在低浓度烯效唑处理下显著增加,但在高浓度处理下出现降低,表明适宜浓度的烯效唑可有效提升向日葵幼苗的抗氧化能力,进而缓解高温引发的氧化胁迫伤害,但当烯效唑浓度过高时,从干重、叶面积等表观参数上可以看出其对幼苗生长产生了抑制作用,导致抗氧化系统遭到破坏。这与合佳敏等[30]的研究结果一致,低浓度烯效唑浸种(15~30 mg/L纯烯效唑)有利于提高抗氧化酶活性,而高浓度(45~60 mg/L)反而起到抑制效果。烯效唑对向日葵幼苗抗氧化系统的调控效应



注:**和*分别代表差异在0.01和0.05水平上具有显著性

Note: ** and * indicate significances at 0.01 and 0.05 levels, respectively. PH: plant height; SD: stem diameter; LA: leaf area; RDW: root dry weight; SDW: shoot dry weight; TDW: total dry weight; R/S: ratio of root to shoot

图2 不同处理下向日葵幼苗各指标间的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of various indices of sunflower seedling under different treatments

与其MDA含量相对应,适当浓度的烯效唑处理显著降低了MDA含量,但是在高浓度下MDA反而增长。值得注意的是,本试验中常温条件下喷施烯效唑后,植株体内H_2O_2含量的增加并非氧化损伤的表征,而是烯效唑调控植物抗逆信号通路引发的主动生理响应。H_2O_2作为植物体内重要的抗逆信号分子,烯效唑处理后会先诱导其合成,再逐步提升植株对其的清除能力。而高温胁迫下,植株体内H_2O_2含量已因胁迫作用升至较高水平,此时烯效唑对H_2O_2的诱导效应减弱,转而通过其他途径介导并强化植株的抗逆信号传递。综合来看,拌种在2.5~5.0 g/L范围或叶面喷施在0.50~0.75 g/L范围,向日葵幼苗SOD和CAT活性最大,同时POD也得到显著提高,活性氧得到有效清除。

3.3 高温胁迫下烯效唑的使用方式选择

拌种和喷施是生产上烯效唑调控作物生长的两种常用使用方式,二者因作用时间、作用部位不同,对植株产生的调控效应也表现出明显不同。拌种方式依赖种子萌发过程中对烯效唑的吸收,其调控作用始于萌发阶段,具有作用时间早的特点。尽管拌种方式下烯效唑浓度较高,但是受限于种子体积及种皮接触面积,种子实际吸收的药剂总量相对有限。相比之下,叶面喷施方式下所用烯效唑浓度虽低,然而叶片的有效接触面积远大于种皮面积,植株对药剂的吸收总量并不低,并且出苗后幼苗代谢活性逐渐增强,对烯效唑的利用效率也随之增加。本试验中,叶面喷施的烯效唑浓度仅有拌种的十分之一左右,但是叶面喷施处理下植株的株高、茎粗、叶面积等生长指标及干物质积累都低于拌种处理,这进一步说明了叶面喷施方式的高效性,也提示在使用过程中需要严格把控喷施浓度,以避免药剂对植株产生的过度抑制效应。

向日葵属于双子叶植物,其子叶在幼苗生长初期可作为临时光合器官,通过短期光合作用合成少量有机物质,补充幼苗生长所需营养,从而提高幼苗定植初期的成活率。待真叶抽出后,子叶的生理功能逐渐衰退并最终枯萎脱落。基于此生理特性,本研究选择在子叶展平期进行烯效唑喷施,该时期既能保证幼苗对药剂的有效吸收,又可最大程度降低烯效唑对真叶生长的干扰,进而为幼苗进入真叶

期后的快速生长奠定基础。

综上所述,采用2.5~5.0 g/L浓度的烯效唑拌种或于子叶展平期喷施0.50~0.75 g/L浓度的烯效唑,可在维持植株较高生长势的前提下,显著提升其抗氧化能力,有效缓解高温胁迫引发的氧化损伤,进而促进壮苗的形成。

4 结论

本试验结果显示,高温胁迫对向日葵幼苗的表观性状及生理参数具有抑制效应,高温胁迫下,幼苗株高、茎粗、叶面积、干物质积累以及根冠比、SPAD均显著降低,MDA含量显著增加。烯效唑作为良好的植物生长调节剂,形态上可以促进茎粗,提高幼苗根冠比,起到了良好的壮苗作用;生理上上参与幼苗的生理调控机制,促进SPAD含量的增加,提高CAT、SOD、POD活性,降低MDA含量,从而缓解高温胁迫对向日葵造成的毒害作用。浓度为2.5~5.0 g/L的烯效唑用于拌种或于子叶展平期喷施0.50~0.75 g/L浓度的烯效唑效果最佳。

参考文献:

[1] 白雪,李丽君,张继安,等. 内蒙古自治区向日葵生产现状及对策[J]. 中国农技推广,2025,41(2):6-8.

[2] 梁晨,李素萍,郭树春,等. 现代向日葵产业与技术发展[J]. 中国种业,2025(11):37-42.

[3] 王士红,纪洪亭,王勇,等. 南京都市圈观赏向日葵品种筛选分类试验研究[J]. 安徽农业科学,2025,53(9):26-29.

[4] 葛非凡,毛克彪,蒋跃林,等. 华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响[J]. 中国农业气象,2017,38(1):42-51.

[5] 孙向伟,高飞翔. 内蒙古河套灌区油用向日葵高温胁迫的关键温度[J]. 中国农学通报,2017,33(25):110-115.

[6] Shehzad M, Gul R S, Rauf S, et al. Development of a robust hydroponic method for screening of sunflower (*Helianthus annuus* L.) accessions for tolerance to heat and osmotic stress [J]. Sci Rep, 2021, 11: 1677. DOI: 10.1038/s41598-021-81072-3.

[7] Donbaloglu Bozca F, Leblebici S. Interactive effect of boric acid and temperature stress on phenological characteristics and antioxidant system in *Helianthus annuus* L [J]. S Afr N J Bot, 2022, 147: 391-399. DOI:10.1016/j.sajb.2022.01.039.

[8] 廖尔华,丁丽,罗延宏,等. 烯效唑浸种对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西南农业学报,2014,27(6):2339-2344.

[9] 王俊,朱庆洋,冷锁虎,等. 种子处理剂不同用量拌种对油菜毯状苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报,2020,42(2):201-209.

[10] Zuo Q S, Wang L, Zheng J D, et al. Effects of uniconazole rate on agronomic traits and physiological indexes of rapeseed blanket seedling[J]. Oil Crop Sci, 2020, 5(4): 198-204. DOI:10.1016/j.ocsci.2020.12.003.

[11] 刘佳,吴天一,朱嘉宇,等. 烯效唑与褪黑素复配对红小豆萌发和根系形态的影响[J]. 作物杂志,2024(1):180-186.

[12] 杜超,张润生,温埃清,等. 烯效唑对向日葵生长调控效应的影响[J]. 北方农业学报,2019,47(6):1-8.

[13] 宁万光,刘红敏,张万平. 烯效唑对小麦幼苗高温胁迫的缓解效应研究[J]. 现代农业科技,2007(14):103-104.

[14] 李宁毅,韩晓芳,宋妍. 高温胁迫下不同浓度烯效唑对百日草幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 吉林农业大学学报,2012,34(1):5-10.

[15] Zhou W J, Leul M. Uniconazole-induced tolerance of rape plants to heat stress in relation to changes in hormonal levels, enzyme activities and lipid peroxidation [J]. Plant Growth Regul, 1999, 27(2): 99-104. DOI: 10.1023/A: 1006165603300.

[16] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994(3):207-210.

[17] 彭建,王丹英,徐春梅,等. 钼酸铵法测定水稻过氧化氢酶活性[J]. 中国农学通报,2009,25(16):61-64.

[18] 史竞艳,罗辛茹,鲍江鸿,等. 超氧化物歧化酶活性的测定[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2012,34(4):373-377.

[19] 张俊杰,蔡长春,曹景林,等. 紫外分光光度法测定烟苗过氧化氢酶活性[J]. 亚热带资源与环境学报,2023,18(4):27-33.

[20] 赵炀,李永生,高秀峰. 基于愈创木酚荧光减量准确测定过氧化物酶活性的新方法[J]. 分析化学,2015,43(7):1040-1046.

[21] Abdel Razik E S, Alharbi B M, Pirzadah T B, et al. γ-Aminobutyric acid (GABA) mitigates drought and heat stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by regulating its physiological, biochemical and molecular pathways [J]. Physiol Plant, 2021, 172(2): 505-527. DOI: 10.1111/ppl.13216.

[22] 李新浩,邢梦柯,周梓惠,等.外源褪黑素通过协调光反应与暗反应增强玉米苗期的耐热性[J].作物学报,2026,52(3):839-856.

[23] 冯丽燕,王国强,李鹏,等. 高温胁迫下外源褪黑素对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中国蔬菜,2025(6):162-167.

[24] 邬雪瑞,李军,武悦,等. 盐胁迫对不同盐敏感性向日

葵幼苗生长和生理特性的影响[J]. 北方农业学报,2022,50(4):18-25.

[25] Mishra N, Jiang C K, Chen L, et al. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms[J]. Front Plant Sci, 2023, 14: 1110622. DOI:10.3389/fpls.2023.1110622.

[26] Rao M J, Duan M, Zhou C, et al. Antioxidant defense system in plants: reactive oxygen species production, signaling, and scavenging during abiotic stress-induced oxidative damage[J]. Horticulturae, 2025, 11: 477. DOI: 10.3390/horticulturae11050477.

[27] 雷毕欣,余勇波,张明通,等. 花后高温胁迫对小麦氮素同化利用及产量形成的影响[J]. 中国农业科学,2025,58(19):3837-3856.

[28] 万燕,闫艳红,杨文钰. 不同氮肥水平下叶面喷施烯效唑对套作大豆生长和氮代谢的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(2):185-196.

[29] Shabala L, MacKay A, Tian Y, et al. Oxidative stress protection and stomatal patterning as components of salinity tolerance mechanism in quinoa (*Chenopodium quinoa*)[J]. Physiol Plant, 2012, 146(1): 26-38. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01599.x.

[30] 合佳敏,张永清,张萌,等. 烯效唑浸种对盐碱胁迫下藜麦农艺性状及生理特性的影响[J]. 作物杂志,2024(2):234-241.

(责任编辑:郭学兰)