

短期极端高温对鸡冠花种子活力及早期幼苗生理特性的影响

贾双双*, 高青海, 刘国祥, 武峰, 张雪平, 周玉丽, 隋益虎

(安徽科技学院生命科学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要: 为明确鸡冠花(*Celosia cristata*)种子对短期高温的耐受性, 种子经短期高温处理 30 min, 采用纸上发芽法测定种子活力及早期幼苗生理指标。结果表明, 60℃下, 鸡冠花种子的相对发芽率、发芽势、相对发芽指数分别为 101.68%、70%、101.41%, 而相对伤害率仅为-1.41%, 其早期幼苗根系长度与侧根数、根系活力、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性与丙二醛(MDA)含量与对照的差异不显著($P>0.05$), 而过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CAT)活性显著高于对照($P<0.05$)。温度再升高, 种子活力逐渐降低, 早期幼苗 CAT 活性、根系活力与叶绿素含量均迅速降低。这说明鸡冠花种子可耐受的短期极限高温为 60℃, 且 CAT 对高温较 SOD 与 POD 敏感, 可作为评价植物对短期高温反应的一个指标。

关键词: 高温胁迫; 鸡冠花; 种子活力; 生理特性

doi: 10.11926/jtsb.3663

Effect of Short-term Extreme High Temperature on Seed Vigor of *Celosia cristata* and Physiological Characteristics of Early Seedlings

JIA Shuang-shuang*, GAO Qing-hai, LIU Guo-xiang, WU Hao, ZHANG Xue-ping, ZHOU Yu-li, SUI Yi-hu

(College of Life Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China)

Abstract: In order to understand the tolerance of cockscomb (*Celosia cristata*) seeds under short-term extreme high temperature for 30 min, the seed vigor and physiological indexes of early seedlings were studied by germination on paper. The results showed that the relative germination rate, germination energy and relative germination index of cockscomb seeds treated under 60℃ were 101.68%, 70%, 101.41%, respectively, and the relative harm rate was only -1.14%. The root length, lateral root number, root activity, chlorophyll content, SOD activity and MDA content of early seedlings had not significant difference with the control ($P>0.05$), but POD and CAT activities were significantly higher than the control ($P<0.05$). The seed vigor, CAT activity, root activity and chlorophyll content decreased with higher temperature. Therefore, the limiting temperature that cockscomb seeds could tolerant was 60℃, the CAT in cockscomb seeds was more sensitive than SOD and POD under high temperature, which could be used as an index to evaluate the reaction of plants to short-term high temperature.

Key words: Heat stress; Cockscomb; Seed vigor; Physiological characteristics

鸡冠花(*Celosia cristata*)是苋科(Amaranthaceae) 行种子繁殖, 可布置花坛和花境, 也可盆栽及作切青苋属一年生草本花卉, 原产非洲、亚洲热带地区^[1], 花材料, 是城市园林景观绿化建设中的优良地被植

收稿日期: 2016-08-15

接受日期: 2016-10-24

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(KJ2017A514, KJ2014A054); 安徽科技学院校级重点学科(AKZDXK2015C05)资助

This work was supported by the Key Project of Education Department of Anhui (Grant No. KJ2017A514, KJ2014A054), and the Key Subject of Anhui Science and Technology University (Grant No. AKZDXK2015C05).

作者简介: 贾双双(1984~), 女, 讲师, 博士, 研究方向为园艺植物栽培生理及分子生物学。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: jiass@ahstu.edu.cn

物,因其耐热、抗热的特性成为高温地区耐热草花引种的重要材料^[2]。

随着温室效应和城市热岛效应的不断加剧,以及我国设施栽培面积的不断加大,使得高温成为花卉设施栽培中最常见的逆境因子。高温逆境不仅会使花卉的外观形态结构发生变化,同时也会降低花卉的观赏价值和使用价值^[3],此外,高温还严重影响花卉种子萌发和生长发育^[4-6]。已有研究表明,高温不仅会降低种子活力,抑制种子萌发^[7-8],但多集中在蔬菜^[7-8]和粮食^[9-10]等作物。另外,高温还对植株抗氧化系统产生一定的影响,金春燕等^[11]的研究表明,高温导致番茄(*Lycopersicon esculentum*)发芽 10 d 的早期幼苗丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性升高,其升幅与品种耐热性强弱有关;而陶俊等^[12]的研究表明,高温处理一品红(*Euphorbia pulcherrima*)幼苗 2 d,除叶片 POD 活性持续增加外,CAT、SOD 活性与 MDA 含量均呈先升高后降低的趋势。目前,关于鸡冠花耐热性研究主要集中在幼苗耐热生理机理方面,且高温处理时间较长^[2],由于鸡冠花在晚春、夏季与早秋保护地育苗栽培中,极易出现短期异常高温天气,但是,其种子在短期极端高温条件下的萌发特性如何?可耐高温程度如何?短期极端高温处理的萌发幼苗保护酶活性及膜脂过氧化反应如何变化?尚不可知。为此,本文以‘世纪’系列玫红色鸡冠花种子为试验材料,通过粗选试验与精确试验相结合的方法,系统研究短期极端高温对鸡冠花种子发芽特性、萌发幼苗保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响,以其筛选出促进鸡冠花种子萌发的极端高温,同时也为设施栽培条件下鸡冠花工厂化育苗、鸡冠花耐热性品种的初步选育以及热带、亚热带地区景观植物的选育和配制奠定理论基础和提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

鸡冠花(*Celosia cristata*)种子是由安徽科技学院花卉基地提供的栽培范围较广的‘世纪’系列玫红色品种,种子系经低温储藏当年采收的干燥种子。

1.2 萌发试验

粗选试验 选取饱满、大小一致的鸡冠花种

子经 1% KMnO₄ 溶液消毒 10 min 后,洗去表面浮色,分别投入 40℃、45℃、50℃、55℃、60℃、65℃ 的恒温水浴锅中处理 30 min,以室温 25℃ 为对照,然后置于室温下浸种 8 h^[13]。每处理随机选取 300 粒种子,置于 12 cm×12 cm 底部放有双层湿润滤纸的发芽盒中,置于 28℃ 恒温培养箱内催芽,每天视水分缺失情况采用称重法补充水分^[14]。3 次重复,以种子胚根突破种皮约 0.20 cm 为发芽标准^[15],每天调查发芽情况,根据发芽情况确定鸡冠花种子耐受高温范围。

精确试验 同样方法选取种子和消毒,将种子分别投入 60℃、61℃、62℃、63℃、64℃、65℃ 的恒温水浴锅中处理 30 min,以室温 25℃ 为对照,每处理随机选取 1000 粒种子,30%用于发芽指标的测定,70%用于生理指标的测定。每天调查发芽情况,待对照有 75%种子出芽后,将发芽盒置于光周期 12 h d⁻¹,昼/夜温度为 28℃/18℃,光照强度为 220 μmol m⁻²s⁻¹ 的光照培养箱中^[16]。处理第 7 天测定发芽种子的 SOD、POD、CAT 活性、MDA 含量、根系活力、叶绿素含量、主根长、下胚轴长及侧根数量等指标。每处理 10 次重复。

1.3 方法

发芽势、发芽率、发芽指数等的计算按下式^[17-18]进行,适当改动。发芽势(GE)=前 3 d 发芽种子数/种子总数×100%,发芽率(GP)=7 d 内发芽种子数/种子总数×100%,相对发芽率(RGP)=处理发芽率/对照发芽率×100%,发芽指数(GI)=Σ(Gt/Dt),相对发芽指数(RGI)=处理发芽指数/对照发芽指数×100%,相对伤害率(RHP)=(对照发芽粒数-处理发芽粒数)/对照发芽粒数×100%,式中,Gt 指发芽天数内总的发芽数,Dt 指鸡冠花种子的发芽天数,长度单位为 cm。

叶绿素采用 80%丙酮浸泡法测定^[19],准确称取新鲜子叶 0.1 g,加入 10 mL 80%丙酮溶液封口浸泡至子叶发白,提取液在 663 nm、646 nm、470 nm 下进行比色测定。

根系活力采用 TTC 法测定^[19],准确称取 0.4 g 根系,加入 0.4% TTC 和磷酸缓冲液(pH 7.0)的等量混合液 10 mL,37℃ 保温 4 h 后,加入 2 mL 1 mol L⁻¹ H₂SO₄,取出根系吸干后,加入 10 mL 95%的乙醇提取 24~36 h,于 485 nm 下进行比色测定。

SOD、POD、CAT、MDA 提取液制备:准确称

取 0.5 g 子叶加入 1 mL 磷酸缓冲液(0.05 mol L^{-1} , $\text{pH}=7.8$), 冰浴研磨, 倒入离心管中, 研磨后分别再加入 1 mL 与 2 mL 缓冲液清洗研钵, 再倒入离心管中, 4°C 下 $8050\times g$ 离心 20 min, 上清液即为提取液。

SOD 活性测定采用氮蓝四唑 NBT 还原法^[20], 取型号相同的试管, 试管中加入 50 μL 提取液(2 支对照试管中各加入磷酸缓冲液 50 μL), 分别加 3 mL 反应液, 其中 1 支对照试管置于暗处, 其余各管于 $220 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 日光下反应 20~30 min。反应结束后, 以不照光的对照管作空白, 于 560 nm 下比色测定吸光度。

POD 活性用愈创木酚法测定^[20], 取 50 μL 提取液, 再加入 3 mL 反应混合液(0.02 mol L^{-1} , $\text{pH} 6.0$ 磷酸缓冲液 50 mL、 H_2O_2 0.019 mL、愈创木酚 0.028 mL 的混合液), 动力学法测定 30 s 内酶活性, 酶活性以 $\text{U min}^{-1}\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示。

CAT 活性用过氧化氢法测定^[20], 取 100 μL 提取液加入 3 mL 反应液(0.01 mol L^{-1} , $\text{pH} 7.0$ 磷酸缓冲液 20 mL 与 5 mL 0.1 mol L^{-1} H_2O_2 的混合液), 动力学法测定, 活性以 $\text{U min}^{-1}\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示。

MDA 含量测定用硫代巴比妥酸(TBA)法^[20], 取上清液 1 mL, 加入 2 mL 0.67% TBA, 封口沸水浴 15 min, 迅速冷却(用冷水冲泡), 倒入离心管中, $900\times g$ 下离心 20 min, 取上清液于 600 nm、532 nm、450 nm 处进行比色测定。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行平均值和标准偏差的计算并制图, 采用 SPSS 17.0 软件 Duncan 法

进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 种子对短期高温忍受能力的筛选

由图 1: A 可以看出, 除 65°C 处理外, 随处理温度的逐渐升高, 鸡冠花种子相对发芽率总体呈现先升高后降低而后趋于平缓的变化趋势。 40°C ~ 55°C 处理后 2 d, 鸡冠花种子的相对发芽率均达到峰值, 分别为 120.20%、135.35%、145.79%、114.14%; 而 60°C 处理后 3 d, 鸡冠花种子的相对发芽率达到峰值, 为 98.70%, 之后, 40°C ~ 60°C 处理下鸡冠花种子相对发芽率逐渐降低而后趋于平稳, 至处理后 7 d, 分别为 111.52%、115.94%、120.42%、106.10% 和 97.44%。而 65°C 处理后 1 d 的种子相对发芽率为 19.84%, 之后逐渐降低, 至处理后 7 d 仅为 7.04%。说明 40°C ~ 60°C 能促进鸡冠花种子萌发, 而 65°C 严重抑制萌发, 因此, 再调查 60°C ~ 65°C 温度区间的鸡冠花种子发芽率等指标。

2.2 短期极端高温对种子相对发芽率的影响

从图 1: B 可以看出, 随着温度的升高, 鸡冠花种子相对发芽率总体呈先升高后降低并趋于平缓的变化趋势。 60°C 处理后 2 d, 鸡冠花种子的相对发芽率达到峰值, 为 121.86%, 至处理后 7 d, 相对发芽率仍有 101.68%。而 61°C 处理后 1 d, 鸡冠花种子的相对发芽率达到峰值, 为 55.56%, 显著低于 60°C 处理, 至处理后 7 d 仅为 27.10%; 62°C 、 63°C 、 64°C 和 65°C 处理的鸡冠花种子相对发芽率较低, 分别于

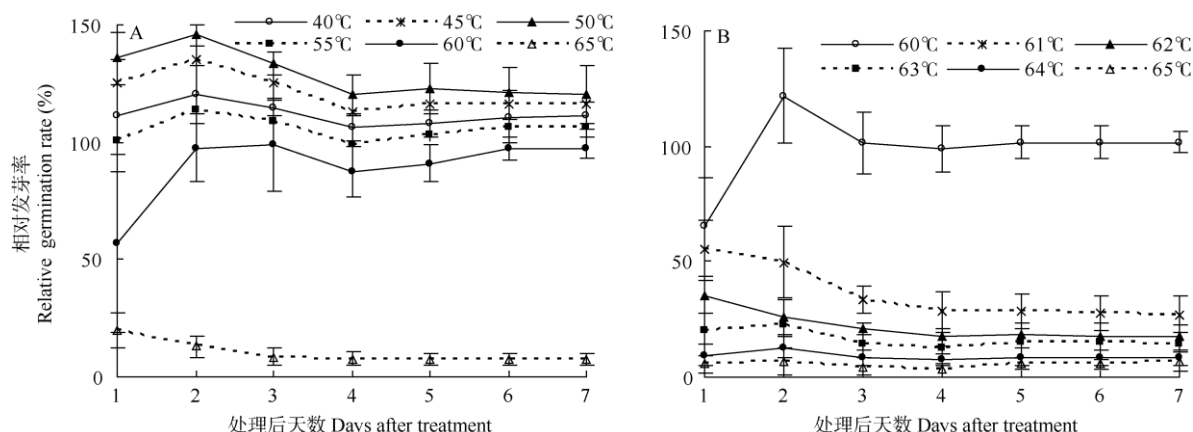


图1 短暂高温对鸡冠花种子相对发芽率的影响

Fig. 1 Effects of short-term high temperature on relative germination rate of *Celosia cristata* seeds

处理后 1 d、1 d、2 d 和 7 d 达到峰值, 相对发芽率分别为 34.92%、22.56%、12.79% 和 6.81%, 均显著低于 60℃ 处理。这说明 60℃ 处理能促进鸡冠花种子萌发, 而 61℃~65℃ 处理显著抑制其发芽。

2.3 短期极端高温对种子发芽势、相对发芽指数与相对伤害率的影响

从图 2 可以看出, 60℃ 处理的鸡冠花种子发芽势与对照差异不大, 说明 60℃ 高温处理能促进鸡冠花种子发芽。随处理温度的升高发芽势迅速降低, 65℃ 处理的种子发芽势仅为 2.22%, 远低于对照和 60℃ 处理, 说明 61℃~65℃ 处理显著抑制鸡冠花种子萌发。鸡冠花种子相对发芽指数的变化趋势与发芽势基本一致, 说明 60℃ 能促进鸡冠花种子萌发, 而 61℃~65℃ 抑制种子萌发。

从图 2 还可以看出, 随着处理温度的升高, 鸡冠花种子的相对伤害率呈逐渐升高的趋势。60℃ 处理对鸡冠花种子相对伤害率为负值, 仅为 -1.41%; 61℃ 处理的相对伤害率为 73.24%; 64℃ 处理的相对伤害率为 91.55%, 均远高于 60℃ 处理, 说明鸡冠花种子可耐 60℃ 高温处理, 而 61℃~65℃ 处理对种子伤害极大。

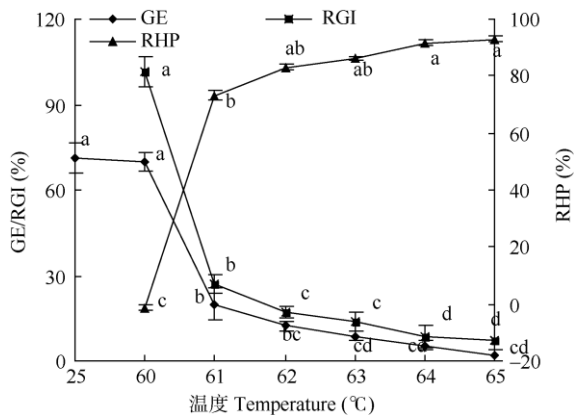


图 2 高温对鸡冠花种子发芽势(GE)、相对发芽指数(RGI)和相对伤害率(RHP)的影响。不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同。

Fig. 2 Effects of high temperature on germination energy (GE), relative germination index (RGI) and relative harm rate (RHP) of *Celosia cristata* seeds. Different letters indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Figures.

2.4 短期极端高温对鸡冠花幼苗主根长度、下胚轴长度与侧根数的影响

从图 3 可见, 随着处理温度的升高, 鸡冠花幼

苗主根长度与下胚轴长度均低于对照。60℃ 处理的鸡冠花幼苗主根长度与下胚轴长度略低于对照, 但差异不大; 而 61℃~65℃ 处理的显著低于对照, 其中 64℃ 和 65℃ 处理, 由于鸡冠花种子发芽受限严重, 其主根长度与下胚轴长度可忽略不计。由图 3 还可以看出, 随着温度的升高, 鸡冠花幼苗的侧根数逐渐降低。60℃ 处理的幼苗侧根数略低于对照, 但差异不大; 63℃ 处理的, 由于主根生长受抑严重, 导致侧根没有萌发。说明 60℃ 对鸡冠花幼苗主根、下胚轴以及侧根的生长抑制程度较弱。

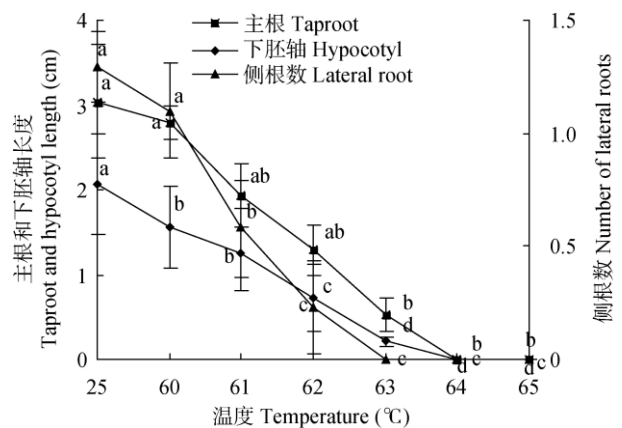


图 3 高温对鸡冠花幼苗主根、下胚轴长度和侧根数的影响

Fig. 3 Effects of high temperature on taproot and hypocotyl length, number of lateral roots of *Celosia Cristata* seedlings

2.5 短期极端高温对幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

从图 4 可见, 随着温度的升高, 鸡冠花幼苗叶绿素含量逐渐降低。60℃ 处理的叶绿素含量仅比对照低 8.83%, 差异不显著。温度升高叶绿素含量迅速降低, 63℃ 处理的叶绿素含量比对照低 91.83%, 差异显著; 而 64℃ 和 65℃ 处理, 由于鸡冠花种子发芽受限非常严重, 叶绿素含量均为 0, 说明 60℃ 高温对鸡冠花幼苗生长抑制作用较弱。从图 4 还可以看出, 随着处理温度的升高, 根系活力的变化趋势与叶绿素含量基本一致, 60℃ 处理的幼苗根系活力仅比对照低 16.63%, 温度升高根系活力迅速下降, 63℃~65℃ 的根系活力为 0, 说明 60℃ 对根系活力抑制作用较弱。

2.6 短期极端高温对幼苗保护酶活性和膜脂过氧化作用的影响

从图 5 可见, 随处理温度的升高, 鸡冠花幼苗

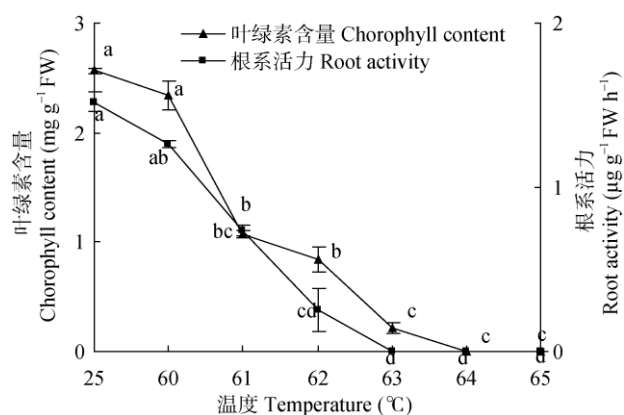


图4 高温对鸡冠花幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

Fig. 4 Effects of high temperature on chlorophyll content and root activity of *Celosia cristata* seedlings

的 SOD 活性呈先升高后降低的趋势。61℃处理的幼苗 SOD 活性最高, 显著高于对照 123.81%; 但 62℃与 63℃处理的 SOD 活性仍显著高于对照; 而 60℃处理仅高于对照 4.97%, 与对照差异不显著。POD 活性与 SOD 活性的变化基本一致, 63℃处理的最高, 显著高于对照 230.01%, 而 60℃~62℃处理的 POD 活性均显著高于对照。而 CAT 活性变化趋势虽也呈现先升高后降低的趋势, 但仅以 60℃处理的最高, 显著高于对照 22.40%; 63℃处理的 CAT 活性降至最低, 显著低于对照 31.25%。从图 5 还可以看出, 随着处理温度的升高, 鸡冠花幼苗 MDA 含量亦逐渐升高。61℃处理的幼苗 MDA 含量增幅较快, 显著高于对照 77.55%; 62℃与 63℃处理的虽显著高于对照, 但增幅较慢; 而 60℃处理的 MDA 含量与对照差异不显著。由于 64℃与 65℃处理的鸡

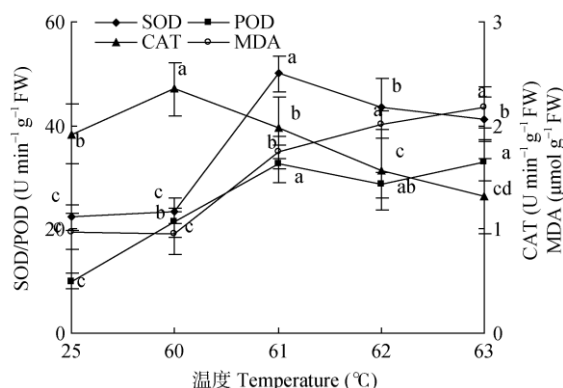


图5 高温对鸡冠花幼苗 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of high temperature on SOD, POD, CAT activities and MDA content of *Celosia cristata* seedlings

冠花种子活力较差, 生长极差, 因此未进行鸡冠花幼苗保护酶活性及 MDA 含量的测定。

3 讨论

在影响种子萌发的众多环境因子之中, 温度是主要的影响因子之一^[21]。前期对番茄(*Lycopersicon esculentum*)^[22]、早熟禾(*Poa annua*)^[23]、叶用莴苣(*Lactuca sativa*)^[8]等的研究表明, 当温度高于植物的适宜发芽温度时, 种子的相对发芽率、发芽势、相对发芽指数等反映种子萌发整齐度与发芽速度的指标均随着温度的升高而降低。章玉平等^[24]的研究表明, 60℃处理鸡冠花种子 20 min, 种子存活率为 0, 而本研究结果却表明, 60℃对鸡冠花种子相对发芽率、发芽势与相对发芽指数影响不大, 可能与所选鸡冠花品种不同有关, 但随着温度的逐渐升高(61℃~65℃), 由于高温突破了种子的承受极限, 导致大部分种子发芽严重受限。本研究结果还表明, 60℃对鸡冠花种子相对伤害率为负值, 仅为-1.41%, 这可能与鸡冠花种子属于油质种子, 其脂肪含量较高, 经充分干燥后其耐高温能力也有所增强有关^[25]; 之后随着温度的升高其相对伤害率迅速升高, 说明 60℃能促进鸡冠花种子萌发, 这也与相对发芽率、发芽势、相对发芽指数等指标相吻合。

高温严重影响植物根系的生长、根系功能的发挥^[26]及叶绿素的合成^[27]。本研究结果表明, 短暂高温(61℃~65℃)不仅严重影响鸡冠花早期幼苗的主根长度、下胚轴长度, 还严重影响其侧根的生长, 导致根系吸收能力降低, 进而影响根系活力与叶绿素的合成, 但 60℃处理对鸡冠花早期幼苗根系生长的影响不大, 根系吸收能力较旺盛, 促进植株生长, 利于叶绿素的合成, 说明鸡冠花种子可耐 60℃极端高温的短期处理。

在正常条件下, 植物体内活性氧的产生与清除维持动态平衡, 但受到高温、干旱、盐渍等逆境胁迫时, 植物会产生大量活性氧, 形成氧化损伤^[28-29], 而 SOD、POD 与 CAT 等是植物体内重要的活性氧清除酶, 可有效清除活性氧自由基^[30], 其中 SOD 能歧化超氧阴离子, 生成 H₂O₂ 和 O₂, 是抗氧化系统的第一道防线; POD 和 CAT 是清除活性氧的主要酶类, 降低氧化损伤。在植物与高温逆境的互作当中, 活性氧清除酶类的变化亦不同^[31]。王凯红等^[32]的研究表明, 杜鹃(*Rhododendron simsii*)幼苗遭受高温胁迫

胁迫后, 其叶片 CAT 活性随胁迫温度的升高而增加, 而 SOD 活性则逐渐降低; 而陶俊等^[12]的研究却表明一品红(*Euphorbia pulcherrima*)幼苗经短期高温处理后, 其叶片 CAT 活性在胁迫初期迅速升高, 而后持续降低, 而 SOD 活性与 POD 活性却增加, 但 SOD 活性与对照差异不大; 彭华婷等^[33]的研究也表明, 大花三色堇(*Viola tricolor* var. *hortensis*)经高温胁迫后, 其叶片 CAT 活性显著降低, 而 SOD 活性则升高; 李永红等^[34]的研究表明, 鸡冠花幼苗经热胁迫处理后, 其叶片 SOD 活性呈先升高后降低的趋势。本研究结果发现, 鸡冠花种子经短期高温处理后, 随着温度的升高, 早期幼苗 SOD、POD 与 CAT 活性均呈先上升后下降的趋势, 但 CAT 活性降低程度与速率显著高于 SOD 与 POD, 说明高温对 CAT 较 SOD 与 POD 敏感, 高温提早加剧了 CAT 的热变性, 使其钝化并逐渐失活^[35]。SOD、POD 与 CAT 活性的下降说明高温打破了活性氧的产生与清除的动态平衡, 造成活性氧大量积累, 引起氧化胁迫, 进而引起膜质过氧化反应, 导致膜结构的完整性被破坏, 使膜脂过氧化终产物即 MDA 含量逐渐增加, 进而导致植物代谢紊乱, 加速根系与叶片的老化, 导致根系活力下降, 同时影响叶绿素的合成, 这与 Zhao 等^[36]和 Haba 等^[37]的研究结果基本一致。因此, 在晚春、夏季及早秋等容易出现短期高温的设施栽培条件下, 应注意选择耐高温能力较好的鸡冠花种子进行育苗; 同时也应注意避免鸡冠花种子的高温曝晒, 以免降低种子活力。

参考文献

- [1] WENG D B, WANG H F. The effect of high altitude treatment on antioxidation activity of water extract from *Celosia argentea* L. (yellow flower) [J]. J Trop Subtrop Bot, 2004, 12(4): 341–344. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2004.04.009.
翁德宝, 汪海峰. 高空气球搭载实验对普通鸡冠花抗氧化作用的诱变效应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(4): 341–344. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2004.04.009.
- [2] WEI Y X, LI Y H, GU M, et al. Relationship between the tolerance to high temperature stress and superoxide dismutases in *Celosia cristata* [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2008, 28(10): 2055–2061. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2008.10.021.
魏玉香, 李永红, 谷茂, 等. 鸡冠花幼苗热胁迫耐性与其 SOD 之间的关联 [J]. 西北植物学报, 2008, 28(10): 2055–2061. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2008.10.021.
- [3] LI Y H, WEI Y X. A simple method to evaluate the high temperature tolerance of *Celosia cristata* [J]. Bull Bot Res, 2009, 29(1): 91–95.
李永红, 魏玉香. 鸡冠花耐热性评价方法研究 [J]. 植物研究, 2009, 29(1): 91–95.
- [4] XIAO G J, ZHANG Q, WANG J. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review [J]. Chin J Appl Ecol, 2007, 18(8): 1877–1885.
肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877–1885.
- [5] DOBSON A P, BRADSHAW A D, BAKER A J M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology [J]. Science, 1997, 277(5325): 515–522. doi: 10.1126/science.277.5325.515.
- [6] DAILY G C, EHRLICH P R. Managing earth's ecosystems: An interdisciplinary challenge [J]. Ecosystem, 1999, 2(4): 277–280. doi: 10.1007/s100219900075.
- [7] SHEN D T, LIU X S, TANG D M, et al. Germination characteristics and heat tolerance in seeds of *Spinacia oleracea* L. under various high-temperature stresses [J]. J Shanghai Jiaotong Univ (Agri Sci), 2012, 30(4): 31–38. doi: 10.3969/J.ISSN.1671-9964.2012.04.006.
沈丹婷, 刘晓嵩, 唐东梅, 等. 高温胁迫下菠菜种子萌发特性及耐热性 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 30(4): 31–38. doi: 10.3969/J.ISSN.1671-9964.2012.04.006.
- [8] ZHANG Q, HAN Y Y, FAN S X, et al. Germination characteristics of *Lactuca sativa* L. under different heat stress [J]. Acta Agric Boreali-Occid Sin, 2010, 19(5): 171–176. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2010.05.038.
张侨, 韩莹琰, 范双喜, 等. 高温胁迫下不同品种叶用莴苣种子萌发特性 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 171–176. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2010.05.038.
- [9] NING D K, XIE L Y, YANG Z Z, et al. Effect of temperature increasing on germination of maize seeds [J]. J Maize Sci, 2013, 21(2): 102–105, 111. doi: 10.3969/j.issn.1005-0906.2013.02.020.
宁大可, 谢立勇, 杨振中, 等. 温度升高对玉米种子萌发的影响 [J]. 玉米科学, 2013, 21(2): 102–105, 111. doi: 10.3969/j.issn.1005-0906.2013.02.020.
- [10] MA J H, WANG H F, WANG Y G, et al. Effects of high temperature aging on germination and physiological characteristics of different cotton varieties [J]. Cott Sci, 2005, 17(1): 42–46. doi: 10.3969/j.issn.1002-7807.2005.01.009.
马金虎, 王宏富, 王玉国, 等. 高温老化对棉花种子发芽及生理特性影响的研究 [J]. 棉花学报, 2005, 17(1): 42–46. doi: 10.3969/j.issn.1002-7807.2005.01.009.
- [11] JIN C Y, GUO S R, ZHU L Y, et al. Effects of high temperature on seed

- germination and seedling growth and antioxidant system of tomato [J]. Acta Agri Shanghai, 2011, 27(2): 92–95. doi: 10.3969/j.issn.1000–3924.2011.02.022.
- 金春燕, 郭世荣, 朱龙英, 等. 高温对番茄种子萌发及早期幼苗生长和抗氧化系统的影响 [J]. 上海农业学报, 2011, 27(2): 92–95. doi: 10.3969/j.issn.1000–3924.2011.02.022.
- [12] TAO J, YU J, YU L Q, et al. Effects of short-term high temperature stress on antioxidant system in poinsettia [J]. Acta Hort Sin, 2008, 35(11): 1681–1684.
- 陶俊, 俞菊, 俞丽琴, 等. 短期高温胁迫对一品红幼苗抗氧化系统的影响 [J]. 园艺学报, 2008, 35(11): 1681–1684.
- [13] LI Y, SHEN Y Y, YAN S G. Comparative studies of effect of NaCl stress on the seed germination of 5 forage species [J]. Pratac Sci, 1997, 14(2): 50–53.
- 李昀, 沈禹颖, 阎顺国. NaCl 胁迫下 5 种牧草种子萌发的比较研究 [J]. 草业科学, 1997, 14(2): 50–53.
- [14] CHEN H Y, ZHANG J H, CHEN Y P, et al. Effects of NaCl stress on germination characteristics of radish (*Raphanus sativus* L.) cultivars [J]. Jiangxi Sci, 1999, 17(2): 96–99. doi: 10.3969/j.issn.1001–3679.1999.02.006.
- 陈火英, 张建华, 陈云鹏, 等. NaCl 胁迫对不同品种萝卜种子发芽特性的影响 [J]. 江西科学, 1999, 17(2): 96–99. doi: 10.3969/j.issn.1001–3679.1999.02.006.
- [15] LIANG H Y, ZHANG X P, HU Z C. Effect of Ca^{2+} on germination of impatiens seeds under salt stress [J]. Jiangsu Agri Sci, 2011, 39(6): 327–329. doi: 10.3969/j.issn.1002–1302.2011.06.131.
- 梁海英, 张雪平, 胡志超. Ca^{2+} 对盐胁迫下凤仙花种子发芽的影响 [J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 327–329. doi: 10.3969/j.issn.1002–1302.2011.06.131.
- [16] ZHU S Y, ZHANG X L, LUO T K, et al. Response of cauliflower seed vigor, antioxidant enzyme activity and seedling photosynthetic pigment to NaCl stress [J]. China Veget, 2012, 1(2): 41–47.
- 朱世杨, 张小玲, 罗天宽, 等. 花椰菜种子活力和抗氧化酶活性及幼苗光合色素对 NaCl 胁迫的响应 [J]. 中国蔬菜, 2012, 1(2): 41–47.
- [17] LIU H L, LI J F, XU X Y, et al. Influence of salt concentration on germination of different tomato seeds [J]. J NE Agri Univ, 2008, 39(5): 28–33. doi: 10.3969/j.issn.1005–9369.2008.05.007.
- 刘洪兰, 李景富, 许向阳, 等. NaCl 胁迫对不同番茄种子萌芽的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(5): 28–33. doi: 10.3969/j.issn.1005–9369.2008.05.007.
- [18] JIA S S, GAO Q H, ZHANG X P, et al. Influence of salt stress on germination characteristics of *Celosia cristata* and *Calendula officinalis* seeds [J]. J Anhui Sci Techn Univ, 2013, 27(6): 34–38.
- 贾双双, 高青海, 张雪平, 等. NaCl 胁迫对鸡冠花和金盏菊种子发芽特性的影响 [J]. 安徽科技学院学报, 2013, 27(6): 34–38.
- [19] GAO J F. Experimental Guidance for Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 57, 74.
- 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 57, 74.
- [20] ZHAO S J, SHI G A, DONG X C. Techniques of Plant Physiological Experiment [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002: 95–97.
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 95–97.
- [21] WANG J N, LI D L. Seed germination responses of four *Limonium* species to temperature [J]. Pratac Sci, 2012, 29(2): 249–254.
- 王俊年, 李得禄. 4 种补血草属植物种子发芽对温度的响应 [J]. 草业科学, 2012, 29(2): 249–254.
- [22] HE J Y, WANG J T, BAI X M, et al. Effects of temperature on seed germination characteristics of eight wild *Poa germplasm* [J]. Pratac Sci, 2013, 30(3): 383–389.
- 贺佳圆, 王靖婷, 白小明, 等. 温度对 8 个野生早熟禾材料萌发特性的影响 [J]. 草业科学, 2013, 30(3): 383–389.
- [23] ZHANG Y P, ZHONG Z C. Effect of extremely higher temperature on germination and seedling growth of *Celosia cristata* [J]. Chin Agri Sci Bull, 2009, 25(19): 174–177.
- 章玉平, 钟志超. 极端高温处理对鸡冠花种子萌发与生长的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 174–177.
- [24] TAHIR I S A, NAKATA N, YAMAGUCHI T, et al. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages [J]. J Agron Crop Sci, 2008, 194(2): 141–151. doi: 10.1111/j.1439-037X.2008.00298.x.
- [25] ZHANG R S, ZHANG S, LI D Z, et al. Primary report on heat tolerance of rape seed [J]. J Inner Mongolia Agri Univ, 2005, 26(4): 125–126. doi: 10.3969/j.issn.1009–3575.2005.04.035.
- 张润生, 张胜, 李得宙, 等. 油菜种子耐高温研究初报 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2005, 26(4): 125–126. doi: 10.3969/j.issn.1009–3575.2005.04.035.
- [26] XU Q Z, HUANG B R, WANG Z L. Photosynthetic responses of creeping bentgrass to reduced root-zone temperatures at supraoptimal air temperature [J]. J Amer Soc Hort Sci, 2002, 127(5): 754–758.
- [27] TOMÁNKOVÁ K, LUHOVÁ L, PETŘIVÁLSKÝ M, et al. Biochemical aspects of reactive oxygen species formation in the interaction between *Lycopersicon* spp. and *Oidium neolyopersici* [J]. Physiol Mol Plant Pathol, 2006, 68(1/2/3): 22–32. doi: 10.1016/j.pmpp.2006.05.005.
- [28] HU X H, LI Y, ZOU T C. Studies on physiological responses to

- aluminum stress of *Plantago asiatica* [J]. J Trop Subtrop Bot, 2014, 22(5): 495–501. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.05.011.
- 胡雪华, 李蕴, 邹天才. 车前对铝胁迫生理响应的研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2014, 22(5): 495–501. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.05.011.
- [29] LUO Y L, BI T J, SU Z L, et al. Physiological response of *Kalanchoe tubiflora* leaves to drought stress and rewatering [J]. J Trop Subtrop Bot, 2014, 22(4): 391–398. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.04.010.
- 罗银玲, 毕婷菊, 苏志龙, 等. 棒叶落地生根对干旱与复水的生理响应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2014, 22(4): 391–398. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.04.010.
- [30] SIDDIQUI M H, AL-KHAISHANY M Y, AL-QUTAMI M A, et al. Morphological and physiological characterization of different genotypes of Faba bean under heat stress [J]. Saudi J Biol Sci, 2015, 22(5): 656–663. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.06.002.
- [31] CUI M, WEI J J, SU X X, et al. Effect of high temperature on the lipid peroxidation and protein expression in cowpea leaves [J]. J SW Univ (Nat Sci), 2016, 38(4): 21–27. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.04.003.
- 崔萌, 魏娟娟, 苏晓星, 等. 高温对豇豆叶片细胞膜脂过氧化和蛋白质表达的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 21–27. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.04.003.
- [32] WANG K H, LIU X P, ZHANG L H, et al. Physiological-biochemical response of five species in *Rhododendron* L. to high temperature stress and comprehensive evaluation of their heat tolerance [J]. J Plant Resour Environ, 2011, 20(3): 29–35. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2011.03.005.
- 王凯红, 刘向平, 张乐华, 等. 5 种杜鹃幼苗对高温胁迫的生理生化响应及耐热性综合评价 [J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(3): 29–35. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2011.03.005.
- [33] PENG H T, GAO Y, DU H M, et al. Effects of heat stress on related physiological indexes of pansy cultivar seedlings [J]. J Shanghai Jiaotong Univ (Agri Sci), 2012, 30(6): 66–71. doi: 10.3969/J.ISSN.1671-9964.2012.06.0013.
- 彭华婷, 高悦, 杜红梅, 等. 高温胁迫对大花三色堇幼苗相关生理指标的影响 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 30(6): 66–71. doi: 10.3969/J.ISSN.1671-9964.2012.06.0013.
- [34] LI Y H, WEI Y X. Relationship between the tolerance difference to high temperature stress and superoxide dismutases (SODs) in different cultivars of *Celosia cristata* [J]. J Agri Biotechn, 2009, 17(1): 126–131. doi: 10.3969/j.issn.1674-7968.2009.01.021.
- 李永红, 魏玉香. 鸡冠花品种间耐热差异与超氧化物歧化酶(SODs)之间的关联 [J]. 农业生物技术学报, 2009, 17(1): 126–131. doi: 10.3969/j.issn.1674-7968.2009.01.021.
- [35] YANG Z, LI S Y, WANG J, et al. Experimental study on the loss of cabbage seed vitality during high temperature drying process [J]. Acta Agri Boreali-Sin, 2007, 22(5): 67–70.
- 杨昭, 李思远, 王娟, 等. 高温干燥对白菜种子生命物质破坏机理的研究 [J]. 华北农学报, 2007, 22(5): 67–70.
- [36] ZHAO H, DAI T B, JING Q, et al. Leaf senescence and grain filling affected by post-anthesis high temperatures in two different wheat cultivars [J]. Plant Growth Regul, 2007, 51(2): 149–158. doi: 10.1007/s10725-006-9157-8.
- [37] de la HAHA P, de la MATA L, MOLINA E, et al. High temperature promotes early senescence in primary leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants [J]. Can J Plant Sci, 2014, 94(4): 659–669. doi: 10.4141/cjps2013-276.