

徐海,宋波,顾宗福,等.热胁迫对不结球白菜生理指标的影响[J].江苏农业科学,2020,48(13):138-143.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.028

热胁迫对不结球白菜生理指标的影响

徐海¹,宋波¹,顾宗福²,毕研飞²,魏斌²

(1.江苏省农业科学院蔬菜研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,江苏南京 210014;

2.江苏常熟国家农业科技园区管理委员会,江苏常熟 215557)

摘要:在热胁迫处理下,对不结球白菜进行叶片生理指标测定,比较不同耐热性材料在热胁迫处理不同时期各项生理指标的差异变化。结果表明,3种材料在热胁迫处理下叶绿素含量及可溶性糖、可溶性蛋白、淀粉等光合产物含量均有所下降;脯氨酸和游离氨基酸等渗透调节物质含量则呈上升趋势,且均以热敏材料上升幅度最大;丙二醛含量在热胁迫处理前后变化不明显;过氧化氢酶活性均为先下降再上升,热胁迫处理后耐热材料高于热敏材料;超氧化物歧化酶活性总体均呈上升趋势,且以热敏材料升高幅度最明显;抗坏血酸氧化酶活性则均呈现先大幅升高再大幅下降的变化趋势。

关键词:不结球白菜;耐热材料;热敏材料;耐热性;热胁迫;生理指标

中图分类号: S634.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)13-0138-06

不结球白菜是我国长江流域各地广泛栽培的一种大众化蔬菜,现占长江中下游大中城市蔬菜复种面积的 30%~40%^[1],其性喜冷凉,在平均气温为 18~20℃条件下生长最适,在高温环境下生育衰弱,短缩茎易伸长,叶片易变黄、变薄,死苗率高,苦味、纤维含量明显增加,食用品质明显下降^[2-4]。

热胁迫会引起植物叶片生理代谢紊乱和细胞结构改变,对光合系统和抗氧化系统产生破坏^[5]。目前对于热胁迫下植物生理生化变化规律的研究

主要集中在光合系统、抗氧化酶类、渗透调节物质、细胞膜稳定性等方面。因此,本研究通过对耐热性不同的不结球白菜种质材料进行热胁迫处理,研究热胁迫对不结球白菜叶片生理生化指标及细胞结构的影响,旨在从生理学和细胞学角度揭示不结球白菜的耐热性。

1 材料与方法

1.1 材料

以不结球白菜耐热材料高华青(热害指数为 24.71)、中等耐热材料苏州青(热害指数为 30.65)和热敏材料矮脚黄(热害指数为 45.19)为试验材料(图 1)。选取籽粒饱满、整齐一致的种子经灭菌后

收稿日期:2019-07-25

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0101803)。

作者简介:徐海(1981—),男,江苏响水人,博士,副研究员,主要从事蔬菜遗传育种研究。E-mail:xuhai407@163.com。

[7]孙金秋,任相亮,胡红岩,等.农田杂草群落演替的影响因素综述[J].杂草学报,2019,37(2):1-9.

[8]章超斌,马波,强胜.江苏省主要农田杂草种子库物种组成和多样性及其与环境因子的相关性分析[J].植物资源与环境学报,2012,21(1):1-13.

[9]强胜.中国杂草生物学研究的新进展[J].杂草学报,2018,36(2):1-9.

[10]郭玉莲,黄春艳,王宇,等.不同耕作模式对大豆土壤杂草种子库的影响[J].安徽农业科学,2016,44(31):89-93.

[11]马波,强胜,魏守辉.农田杂草种子库研究方法[J].杂草科学,2004(2):5-8.

[12]章家恩.生态学常用实验研究方法与技术[M].北京:化工出版社,2004:117-119.

[13]于顺利,蒋高明.土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J].

植物生态学报,2003,27(4):552-560.

[14]袁莉,周自宗,王震洪.土壤种子库的研究现状与进展综述[J].生态科学,2008,27(3):186-192.

[15]朱文达,魏守辉,张朝贤.稻油轮作田杂草种子库组成及其垂直分布特征[J].中国油料作物学报,2007,29(3):313-317.

[16]郑永利,藤敏忠.稻茬免耕麦田杂草种子库调查[J].浙江农业科学,2001(2):90-91.

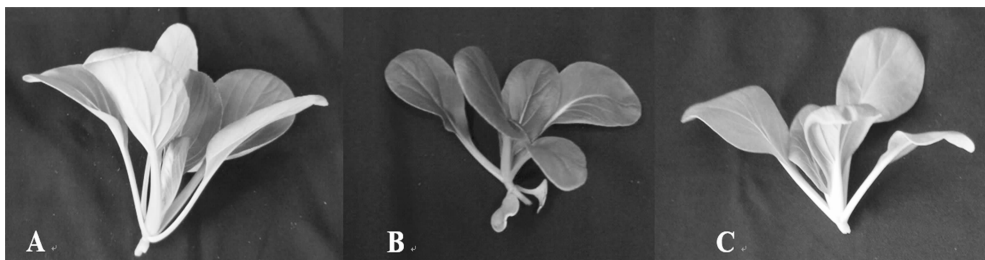
[17]牛永志.秸秆还田和不同耕作方式对稻麦轮作田土壤杂草种子库的影响[J].江苏农业科学,2008(1):79-81.

[18]Carol C B, Jerry M B, Seeds Ecology. Bio-geography and evolution of dormancy and germination[M]. San Diego, California: Academic Press, 1998.

[19]Cardina J, Herms C P, Doohan D J. Crop rotation and tillage system effects on weed seed banks[J]. Weed Science, 2002, 50(4): 448-460.

播种于装有灭菌基质的穴盘中,在人工气候箱中于昼/夜温度为 25 ℃/15 ℃、光—暗周期 12 h—12 h,

光照度为 12 000 lx 条件下培养。



A—高华青; B—苏州青; C—矮脚黄

图1 不结球白菜试验材料

1.2 生理指标测定

采用比色法测定叶绿素含量;采用硫酸萘酚比色法测定可溶性糖含量;采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量;采用碘显色法测定淀粉含量;采用茚三酮比色法测定脯氨酸(Pro)含量;采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定丙二醛(MDA)含量;采用茚三酮比色法测定游离氨基酸含量;紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用滴定法测定抗坏血酸氧化酶(AAO)活性^[6-7]。

2 结果与分析

2.1 热胁迫对不结球白菜叶绿素含量的影响

耐热材料高华青的叶色为绿色,苏州青的叶色为深绿色,热敏自交系矮脚黄叶色为黄绿色(图1)。由图2可见,热胁迫处理前,参试材料的叶绿素含量差异较大,叶色最深的苏州青叶绿素含量最高(1.35 mg/g),比叶色最浅的矮脚黄(0.76 mg/g)高近1倍,也高于高华青;热胁迫处理后1~3 d,3份材料的叶绿素含量均呈明显下降趋势,但仍以苏州青最高,矮脚黄最低;热胁迫处理5 d后,苏州青的叶绿素含量回升至1.31 mg/g,仍为3个材料中最高,高华青和矮脚黄的下降趋势则趋于平缓。总体来看,热胁迫处理5 d后,3个材料的叶绿素含量均较处理前降低,由此说明热胁迫对不结球白菜叶绿素合成有明显的抑制作用。

2.2 热胁迫对可溶性糖含量的影响

由图3可知,热胁迫处理前,3个材料的可溶性糖含量差异较大,耐热材料高华青的含量为11.36 mg/g,明显高于苏州青(2.70 mg/g)和矮脚黄(5.60 mg/g);热胁迫处理1 d后,3个材料的可溶性糖含量变化不大,高华青稍降至10.91 mg/g,

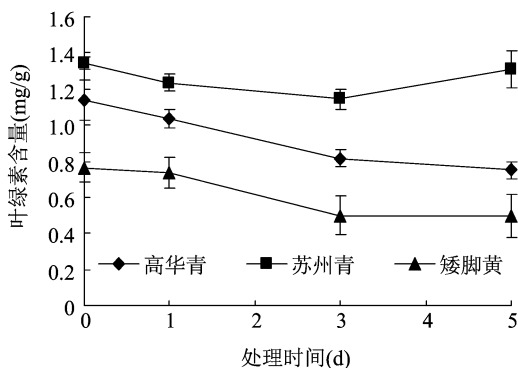


图2 热胁迫对不结球白菜叶绿素含量的影响

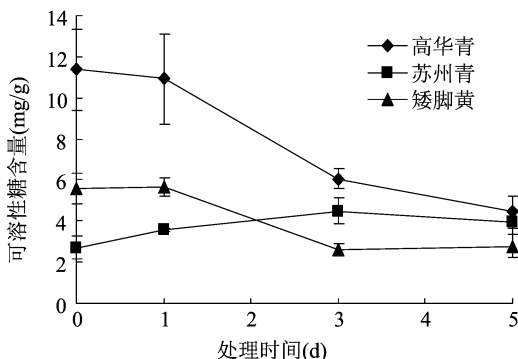


图3 热胁迫对不结球白菜可溶性糖含量的影响

苏州青和矮脚黄则略有上升;热胁迫处理3 d后,高华青和矮脚黄的可溶性糖含量均呈大幅下降趋势,苏州青则仍保持上升趋势,并超过矮脚黄位居第2;热胁迫处理5 d后,高华青的可溶性糖含量继续呈下降趋势,而苏州青和矮脚黄的变化趋势趋于平缓,此时高华青的可溶性糖含量仍为最高(4.46 mg/g),矮脚黄最低(2.79 mg/g)。说明热胁迫抑制了不结球白菜叶片中可溶性糖的合成,但是叶色最深的苏州青则可能因具有较强的光合能力,在热胁迫处理5 d内可溶性糖含量没有降低。

2.3 热胁迫对不结球白菜可溶性蛋白含量的影响

由图4可知,热胁迫处理前,3个材料的可溶性

蛋白含量差异较大,其中耐热材料高华青最高(4.44 mg/g),苏州青略低(3.95 mg/g),热敏材料矮脚黄最低(2.69 mg/g);热胁迫处理 1 d 后,高华青和苏州青的可溶性蛋白含量均有所降低,矮脚黄则略有增加;热胁迫处理 3 d 后,高华青的可溶性蛋白含量开始回升,苏州青和矮脚黄则均呈较大幅度下降趋势;热胁迫处理 5 d 后,3 个材料的可溶性蛋白含量均呈上升趋势,高华青和矮脚黄上升幅度较大,此时高华青的可溶性蛋白含量为 3.95 mg/g,远高于苏州青和矮脚黄。

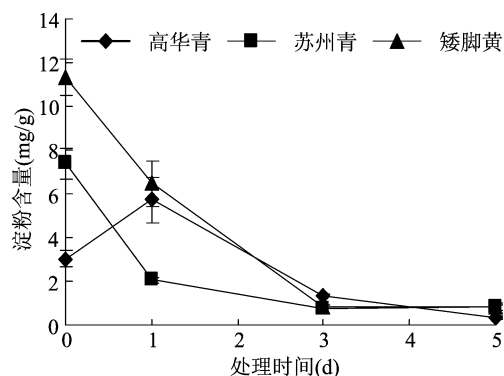


图5 热胁迫对不结球白菜淀粉含量的影响

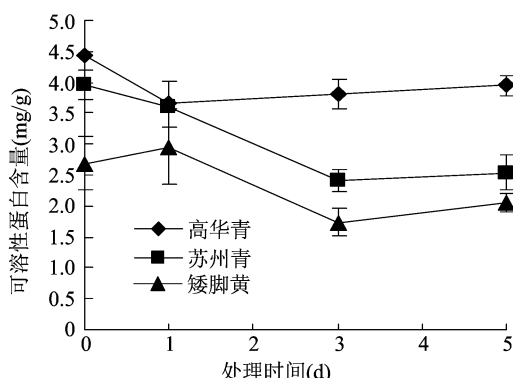


图4 热胁迫对不结球白菜可溶性蛋白含量的影响

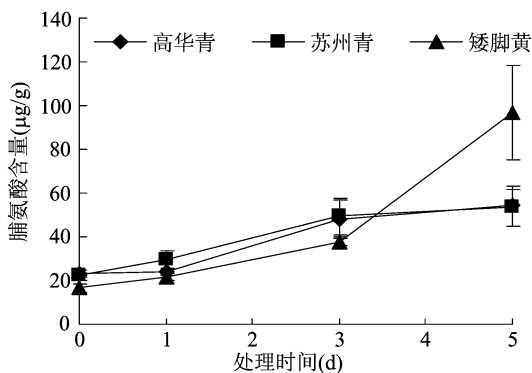


图6 热胁迫对不结球白菜脯氨酸含量的影响

2.4 热胁迫对不结球白菜淀粉含量的影响

由图 5 可知,热胁迫处理前,3 个材料的淀粉含量差异较大,其中热敏材料矮脚黄的含量最高(11.37 mg/g),苏州青略低(7.38 mg/g),耐热材料高华青最低(3.03 mg/g);热胁迫处理 1 d 后,矮脚黄和苏州青的淀粉含量均大幅降低,高华青则大幅上升并超过苏州青,仅略低于矮脚黄;热胁迫处理后 1~5 d,3 个材料的淀粉含量均总体呈降低趋势,最终仍维持热胁迫处理前的排序,热胁迫处理 5 d 后,矮脚黄淀粉含量最高(0.84 mg/g),苏州青次之(0.79 mg/g),高华青最低(0.32 mg/g)。总体来看,参试材料的淀粉含量均低于热胁迫处理前,说明热胁迫抑制了不结球白菜叶片中淀粉的合成。

2.5 热胁迫对不结球白菜脯氨酸含量的影响

由图 6 可知,热胁迫处理前,3 个材料的 Pro 含量较为接近,耐热材料高华青的含量最高(23.11 μg/g),苏州青次之(22.02 μg/g),热敏材料矮脚黄最低(16.42 μg/g);热胁迫处理期间,参试材料的 Pro 含量均呈持续上升趋势,处理 5 d 后矮脚黄的 Pro 含量升至最高,约是高华青和苏州青的 2 倍。总体来看,参试材料的 Pro 含量均明显高于热胁迫处理前,说明热胁迫促进了不结球白菜叶

片中 Pro 的合成,以应对高温引起的渗透胁迫。

2.6 热胁迫对不结球白菜丙二醛含量的影响

由图 7 可知,热胁迫处理前,3 个材料的 MDA 含量差异较大,其中耐热材料高华青的含量最高(0.012 5 μmol/g),苏州青次之(0.010 5 μmol/g),热敏材料矮脚黄最低(0.008 7 μmol/g);热胁迫处理 1 d 后,3 个材料的 MDA 含量均发生小幅变化,高华青和矮脚黄略升高,苏州青略降低;热胁迫处理 3 d 后,3 个材料的 MDA 含量均呈下降趋势;热胁迫处理 5 d 后,高华青和苏州青的 MDA 含量转而升高,矮脚黄则继续小幅下降,最终 MDA 含量仍为耐热材料高华青和苏州青高于热敏材料矮脚黄,且 3 个材料的 MDA 含量较处理前基本无变化。

2.7 热胁迫对不结球白菜游离氨基酸含量的影响

由图 8 可知,热胁迫处理前,3 个材料的游离氨基酸含量较为接近,均为 0.4 mg/g 左右;热胁迫处理 1 d 后,3 个材料的游离氨基酸含量均小幅上升;热胁迫处理 3 d 后,高华青的游离氨基酸含量略下降,苏州青仍呈小幅上升趋势,矮脚黄则大幅上升至最高;热胁迫处理 5 d 后,3 个材料的游离氨基酸含量均继续上升,矮脚黄的游离氨基酸含量仍为最高(1.42 mg/g),高华青(1.10 mg/g)和苏州青

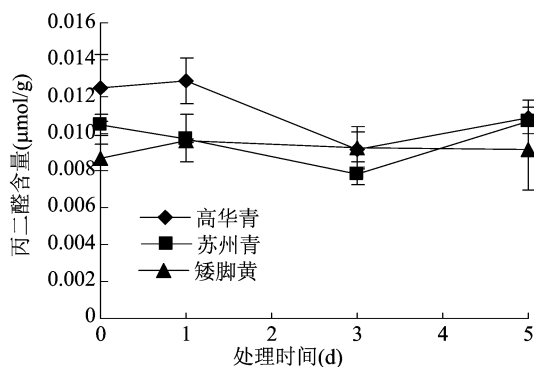


图7 热胁迫对不结球白菜丙二醛含量的影响

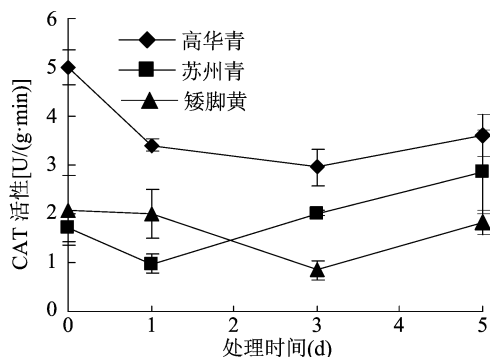


图9 热胁迫对不结球白菜 CAT 活性的影响

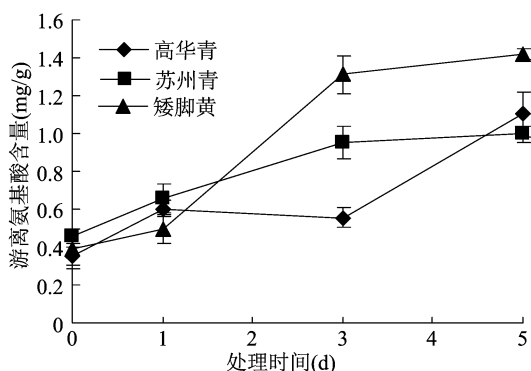


图8 热胁迫对不结球白菜游离氨基酸含量的影响

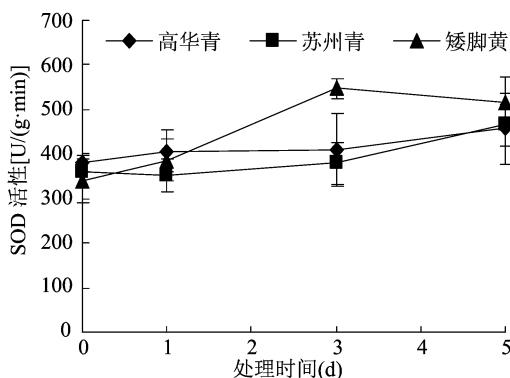


图10 热胁迫对不结球白菜 SOD 活性的影响

(1.00 mg/g)略低。总体来看,热胁迫处理诱导不结球白菜叶片中产生大量的游离氨基酸,以应对高温引起的渗透胁迫。

2.8 热胁迫对不结球白菜过氧化氢酶活性的影响

由图9可知,热胁迫处理前,3个材料的CAT活性差异较大,耐热材料高华青的CAT活性[4.99 U/(g·min)]远高于苏州青[1.72 U/(g·min)]和矮脚黄[2.08 U/(g·min)];热胁迫处理1 d后,3个材料的CAT活性均下降;热胁迫处理3 d后,高华青和矮脚黄的CAT活性继续下降,苏州青则转而升高;热胁迫处理5 d后,3个材料的CAT活性均升高;高华青的CAT活性在热胁迫处理全过程中均为最高,苏州青最终升至第2位。总体来看,热胁迫处理5 d后,对不结球白菜耐热材料的CAT活性高于热敏材料。

2.9 热胁迫对不结球白菜超氧化物歧化酶活性的影响

由图10可知,热胁迫处理前,3个材料的SOD活性较为接近,耐热材料高华青的活性略高[378.95 U/(g·min)],苏州青次之[361.78 U/(g·min)],矮脚黄略低[340.97 U/(g·min)];热胁迫处理1 d后,3个材料

的SOD活性变化幅度较小,高华青和矮脚黄小幅上升,苏州青小幅下降;热胁迫处理3 d后,高华青和苏州青的SOD活性小幅上升,矮脚黄则呈大幅度上升,跃居第1位;热胁迫处理5 d后,高华青和苏州青继续小幅上升,矮脚黄虽小幅下降,但仍为3个材料中最高。总体来看,热胁迫处理诱导了SOD活性的提高,3份材料均高于处理前,尤以热敏材料矮脚黄的SOD活性升高幅度最明显。

2.10 热胁迫对不结球白菜抗坏血酸氧化酶活性的影响

由图11可知,热胁迫处理前,3个材料的AAO活性差异较大,其中高华青的AAO活性最低[0.007 1 U/(g·min)],仅为另外2个材料AAO活性的1/2左右;热胁迫处理后1~3 d,参试材料的AAO活性均大幅升高,3个材料的AAO活性排序未发生变化;热胁迫处理后3~5 d,参试材料的AAO活性又同时大幅降低,其中高华青和苏州青降幅略小,仍略高于处理前,矮脚黄降幅最大,已低于处理前水平。总体来看,热胁迫下不结球白菜AAO活性呈现先大幅升高再大幅下降的变化趋势。

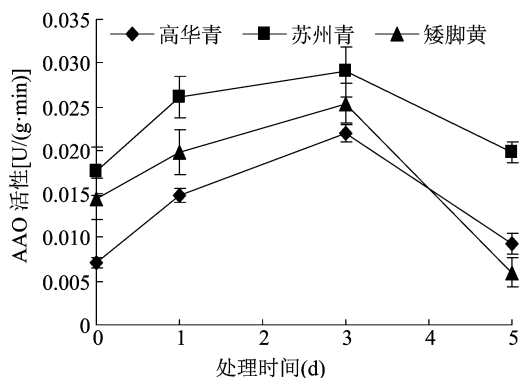


图11 热胁迫对不结球白菜 AAO 活性的影响

3 讨论

3.1 叶绿素、光合产物与植物耐热性

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,光合作用是指绿色植物通过叶绿体,把光能用二氧化碳和水转化成化学能,储存在有机物中,并且释放出氧的过程。叶绿素含量的多少与光合作用的强弱密切相关。热胁迫会破坏叶绿体类囊体的理化性质及组织,导致叶绿体降解,从而降低细胞中参与光合反应的酶活性,致使叶绿素含量下降,叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值降低^[8],进而破坏植物生理机制的正常运行,抑制营养物质在植物体内的积累,造成植物体内代谢紊乱,最终降低产量和品质^[9-12]。

本研究结果显示,在热胁迫过程中,不同品种不结球白菜叶片中叶绿素含量均较处理前有所降低。热胁迫处理后不结球白菜叶片中淀粉含量明显下降,这也印证了随着叶绿素含量的减少,叶片光合作用减弱,进而影响淀粉的合成。

可溶性糖也是重要的光合产物,本研究中热胁迫初期(1 d)苏州青和短脚黄叶片中可溶性糖含量略有升高,但随着处理时间的延长(3~5 d),高华青和矮脚黄叶片中可溶性糖的积累明显下降,可能是热胁迫后期叶绿素降解导致光合效率降低引起的,这与周伟香等对金线兰的研究结果^[13]一致。但是叶色最深、叶绿素含量变化不大的苏州青叶片中的可溶性糖含量并未降低,这也间接说明其叶片具有较强的光合能力。

3.2 渗透调节物质与植物耐热性

可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸和游离氨基酸等是植物中重要的渗透调节物质,其含量的增加有利于细胞结构和功能在逆境下的维持。可溶性糖

在逆境条件下具有维持细胞结构和功能的作用,可作为鉴定植物抗性的一个生理指标。热胁迫使可溶性糖含量降低,不同高温处理下可溶性糖含量即使有上升趋势,但也一直低于对照^[11-15],且耐热品种的可溶性糖含量降低幅度小于热敏性品种^[16]。可溶性蛋白含量高低直接与植物耐热性相关^[17]。有研究发现,耐热大白菜品种在高温下可保持较高的蛋白质合成速率和较低的蛋白质降解速率^[18]。脯氨酸是植物中重要的渗透调节物质,植物在遇到逆境胁迫时,脯氨酸合成酶类对脯氨酸的反馈抑制敏感性降低,导致体内脯氨酸含量增加,且增长的百分率大小与耐热性有关。已有研究证实,脯氨酸的积累量与植物的抗逆性呈正相关,外施脯氨酸有助于提高植物的抗渗透胁迫能力^[19-21]。游离氨基酸被认为是胁迫条件下的渗透保护剂,因为它的积累能够提高渗透压,从而保持膜的完整性和蛋白质的稳定性^[22-25]。

本研究中热胁迫处理下高华青和矮脚黄的可溶性糖含量均呈下降趋势,并随着胁迫时间的延长持续降低;可溶性蛋白含量在热胁迫下则总体呈先下降再回升的变化趋势;脯氨酸、游离氨基酸含量则随着热胁迫处理时间的延长而持续升高。热胁迫下耐热材料的可溶性蛋白含量均高于热敏材料,这有利于减缓高温对细胞组织的损伤,使植株具有更强的耐热性。

3.3 膜脂过氧化及抗氧化系统与植物耐热性

植物在热胁迫下产生的大量活性氧(ROS)会引起膜脂过氧化,导致大量过氧化产物 MDA 产生,对植物的细胞膜系统造成损伤^[26]。但是本研究中 3 份材料的 MDA 含量随着热胁迫时间的延长均无明显变化,可能与处理的高温强度和持续时间不足有关,数据未能充分反映不结球白菜细胞膜的受损程度,也无法由此判断材料间的耐热性差异。

植物通过使用抗氧化底物和保护酶来对抗氧化应激^[27-29]。植物体内的 CAT、SOD 和 AAO 等能够有效清除细胞内的 ROS,在热胁迫下,这些保护酶类活性的增大有利于缓解过量的 ROS 对细胞的损伤。ROS 被 SOD 转化形成 H_2O_2 ,AAO 可将抗坏血酸(AsA)氧化成脱氢抗坏血酸并去除 H_2O_2 。CAT、SOD、AAO 活性能够作为小麦幼苗期耐热性筛选的生理指标^[30]。

短时间热胁迫会提高 SOD 活性,但随着胁迫时间的延长,SOD 活性呈下降趋势,且耐热性强的

品种 SOD 活性高于耐热性差的品种^[31-32]。在热胁迫下大豆耐热品种的 SOD 活性高于热敏感品种,并且其活性随着温度的升高而增强^[33]。本研究结果与前人研究结果有一定的差异,在热胁迫处理下,不结球白菜叶片中 SOD 活性呈上升趋势,处理初期(0~1 d),耐热品种 SOD 活性高于热敏品种,而随着处理时间的延长(3~5 d),热敏品种 SOD 活性上升幅度增大,并超过了耐热品种。可能是由于在适应长时间的热胁迫后所激发的 SOD 活性保持较高状态,具体原因有待进一步试验分析。

参考文献:

- [1] 侯喜林. 不结球白菜育种研究新进展[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 111-115.
- [2] 刘维信, 曹寿椿. 夏季自然高温条件下不结球白菜品种评价及相关性状的研究[J]. 山东农业大学学报, 1993, 24(2): 176-182.
- [3] 周伟华, 黄贞, 陈兴平. 电导法鉴定小白菜耐热性初步研究[J]. 长江蔬菜, 1999(7): 30-32.
- [4] 胡倩强, 陈龙正, 张永吉, 等. 普通白菜苗期耐热性鉴定方法研究[J]. 中国蔬菜, 2011, 2(1): 56-61.
- [5] 张宗申, 利容千, 王建波. 外源 Ca^{2+} 预处理对高温胁迫下辣椒叶片细胞膜透性和 GSH、AsA 含量及 Ca^{2+} 分布的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 230-234.
- [6] 徐昌杰, 陈文峻, 陈昆松, 等. 淀粉含量测定的一种简便方法——碘显色法[J]. 生物技术, 1998, 8(2): 41-43.
- [7] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 134-279.
- [8] 艾青, 牟同敏. 水稻耐热性研究进展[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(1): 107-111.
- [9] 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1345-1352.
- [10] 夏天舒, 卞景阳, 谭贺, 等. 垦丰 11 大豆品种高温胁迫响应研究[J]. 黑龙江农业科学, 2010(12): 23-25.
- [11] 包刚, 覃志豪, 周义, 等. 气候变化对中国农业生产影响的模拟评价进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 303-307.
- [12] 段骅. 高温与干旱对水稻产量和品质的影响及其生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [13] 周伟香, 龚宁, 李凯, 等. 高温胁迫对金线兰生理特性影响的研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2007, 25(3): 25-28.
- [14] 刘媛媛, 滕中华, 王三根, 等. 高温胁迫对水稻可溶性糖及膜保护酶的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 59-63.
- [15] 赵森, 于江辉, 肖国樱. 高温胁迫对爪哇稻剑叶光合特性和渗透调节物质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 110-115.
- [16] 陈秀晨, 王士梅, 朱启升, 等. 水稻品种耐热性与相关生化指标的关联分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1633-1639.
- [17] 叶陈亮, 柯玉琴, 陈伟. 大白菜耐热性的生理研究 III. 酶性和非酶性活性氧清除能力与耐热性[J]. 福建农业大学学报, 1997, 26(4): 115-118.
- [18] 王志和, 于丽艳, 曹德航, 等. 短期高温处理对大白菜几个生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(3): 82-85.
- [19] 陈因, 方大惟. 外源脯氨酸对受 NaCl 胁迫的蓝藻固氮活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 254-258.
- [20] 全先庆, 张渝洁, 单雷, 等. 高等植物脯氨酸代谢研究进展[J]. 生物技术通报, 2007(1): 14-18.
- [21] 沙汉景. 外源脯氨酸对盐胁迫下水稻耐盐性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [22] Fotelli M N, Rennenberg H, Gessler A. Effects of drought on the competitive interference of an early successional species (*Rubus fruticosus*) on *Fagus sylvatica* L. seedlings: N-15 uptake and partitioning, responses of amino acids and other N compounds[J]. Plant Biology 2002, 4(3): 311-320.
- [23] Hare P D, Cress W A, Staden J. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress[J]. Plant, Cell and Environment, 1998, 21(6): 535-553.
- [24] McNeil S D, Nuccio M L, Hanson A D. Betaines and related osmoprotectants, targets for metabolic engineering of stress resistance[J]. Plant Physiology, 1999, 120(4): 945-949.
- [25] 季杨, 梁小玉, 易军, 等. Na^+ 在鸭茅适应抗氧化防御和渗透胁迫中的生理作用[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 160-163.
- [26] Martineau J R, Specht J E, Williams J H, et al. Temperature tolerance in soybeans. I. evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability[J]. Crop Science, 1979, 19(1): 75-81.
- [27] 辛松林, 秦文, 孙传红, 等. 腐皮镰孢霉菌侵染及保鲜剂处理对秋葵相关抗性酶的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 4(5): 161-1168.
- [28] Polle A. Dissecting the superoxide dismutase - ascorbate - glutathione - pathway in chloroplasts by metabolic modeling. Computer simulations as a step towards flux analysis[J]. Plant Physiology, 2001, 126(1): 445-462.
- [29] 陈天, 刘云根, 王妍, 等. 外源磷对砷胁迫下挺水植物抗氧化酶系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1040-1046.
- [30] Amjad H, Madiha G, Nayyer I. Heat stress - induced cell death, changes in antioxidants, lipid peroxidation, and protease activity in wheat leaves[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2012, 31(3): 283-291.
- [31] 谢晓金, 李秉柏, 申双和, 等. 高温胁迫对扬稻 6 号剑叶生理特性的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 84-87.
- [32] 卢琼琼, 李新山, 严登华. 高温胁迫对大豆幼苗生理特性的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 112-115, 124.
- [33] 靳路真, 王洋, 张伟, 等. 高温胁迫对不同耐性大豆品种生理生化的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 63-71.