



李刚,李靖琪,魏庆红,等.水杨酸对高温胁迫下白术生理特性的影响[J].黑龙江农业科学,2024(1):37-45.

水杨酸对高温胁迫下白术生理特性的影响

李刚^{1,2},李靖琪¹,魏庆红²,段伟伟³,陈娜¹

(1.亳州职业技术学院 安徽中药材种植联合研究中心,安徽 亳州 236800; 2.中药饮片制造新技术安徽省重点实验室,安徽 亳州 236800; 3.安徽协和成药业饮片有限公司,安徽 亳州 236800)

摘要:为筛选出适宜缓解高温胁迫伤害的最佳 SA 浓度。研究喷施 0.5、1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 3 种不同浓度的 SA 溶液,同时进行不同程度的高温处理后,测定盆栽白术苗叶片的叶绿素荧光参数、根系扫描参数及根系活力,研究水杨酸(SA)对高温胁迫下白术种苗的缓解效应。结果表明,对叶绿素荧光测定的 Fv'/Fm'、ΦPSⅡ、NPQ 三个参数,高温胁迫下 CK 组 NPQ 值均大于处理组,而 CK 组的 Fv'/Fm'和 ΦPSⅡ值均小于处理组,且与对照组相比喷施 0.5 mmol·L⁻¹ 的 SA 溶液效果最为显著。喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 对高温胁迫下白术种苗根系表面积能起到促进作用,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 的促进作用在根长、投影面积及平均直径方面的作用较显著。同时喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 溶液的白术种苗根系活力的数值最高。综上,0.5 mmol·L⁻¹ 的 SA 能缓解高温对白术苗伤害的能力最强。

关键词:白术;水杨酸;高温胁迫;叶片

白术为菊科植物白术(*Atractylodes macrocephala* Koidz)的干燥根茎。其味苦,性温,具有燥湿利水、健脾益气、安胎、止汗的功效^[1],为我国重要的大宗类中药材。白术喜凉爽气候,怕高温多湿。在白术种苗生长期,常会遭遇高温高湿天气。高温胁迫下植物会发生气孔关闭、光合作用下降、干物质产量下降、呼吸作用减弱等情况,且抗氧化系统的信号与代谢过程会发生反常现象,从而破坏植物正常生长发育影响中药材产量。研究发现高温下小白菜的叶片变黄、出现死斑以及花序大量脱落等不同程度的热害症状^[2-4]。同时,高温胁迫对植物的细胞结构、生理代谢、基因表达等都会造成不可逆转的影响与损伤,最终导致植物器官功能的丧失或死亡^[5-8]。

水杨酸(SA)是一种酚类物质,在植物体内是重要的内源信号分子。水杨酸在植物正常生长发育过程中比如种子萌发、开花等过程中起到重要作用。已有研究中使用 SA 对蝴蝶兰种苗进行预处理,通过提高蝴蝶兰的抗氧化酶的活性从而提高其耐热性^[4,9]。另有研究通过 SA 处理番茄幼苗发现,适宜浓度的 SA 能够降低叶片丙二醛(MDA)的质量摩尔浓度,提高植物幼苗叶片中脯氨酸(Pro)质量分数,提高植物幼苗的抗高温能

力^[10-12]。目前,有关白术耐热方面的相关研究较少。本研究以白术为材料,通过对叶面喷施不同浓度的 SA,研究 SA 对白术幼苗耐热性的影响,为白术幼苗耐热性研究和白术的耐热育种提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验药剂 水杨酸(C₇H₆O₃)、TTC(C₁₉H₁₅ClN₄)、磷酸氢二钠(Na₂HPO₄)、硫酸(H₂SO₄)、乙醇(C₂H₅OH)、乙酸乙酯(C₄H₈O₂)、低亚硫酸钠(Na₂S₂O₄)、磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O),以上试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器 叶绿素荧光仪(Handy FluorCam)、紫外分光光度计(UV-5900)。

1.2 方法

1.2.1 种苗培养 本试验采用盆栽法,于 2023 年 3 月在亳州兴禾农业发展有限公司温室大棚内进行播种育苗,全程无遮光处理,24 h 通风,白天温度为 22~35℃。生长 20 d 后进行间苗,留下长势一致的白术种苗作为试验材料。

1.2.2 试验设计 待白术种苗长到有 3~5 片真叶时,选取生长健壮、大小一致的白术种苗移栽到

收稿日期:2023-08-10

基金项目:2022 年高校优秀人才培育项目(gxgnfx2022164);亳州职业技术学院中医药研究专项(ZXky2215)。

第一作者:李刚(1989—),男,硕士,助理研究员,从事中药材育种研究。E-mail:ligangji@126.com。

通信作者:陈娜(1982—),女,硕士,副教授,从事药用植物栽培与发育研究。E-mail:chenna356@163.com。

育苗盘中,缓苗后,放入光照培养箱,设置 38 ℃ 高温配制 0.5、1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 溶液,用小喷壶均匀喷于白术幼苗上,每天胁迫处理 4 h,胁迫周期为 5、4、3、2 和 1 d,共 20 个处理,每个处理重复 3 次,详见表 1。

表 1 高温胁迫处理分组

分组	SA 浓度设置/(mmol·L ⁻¹)	高温胁迫天数/d
A	0.5,1.0,2.0,0(CK)	5
B	0.5,1.0,2.0,0(CK)	4
C	0.5,1.0,2.0,0(CK)	3
D	0.5,1.0,2.0,0(CK)	2
E	0.5,1.0,2.0,0(CK)	1

1.2.3 叶绿素荧光法测定NPQ 选择晴天上午 10:00 进行测定,用 10 个叶夹对 10 片大小相当的健康叶片相同部位,分别进行 20 min 以上暗适应。对暗适应的植物叶片进行 NPQ 测量,设定好分配 50 个光照强度,程序自动分配好测量所需的光强度,依次对后续 9 个叶片进行 NPQ 测量^[13-17]。每个处理测定 3 株,重复 3 次,直到测完 5 组种苗。

1.2.4 便携式叶绿素荧光法测定叶片成像 将白术幼苗进行 30 min 的遮光暗处理,光化光(activic light)强度设定为 281 μmol·m⁻²·s⁻¹,选择 Fluorcam 叶绿素荧光成像(便携式)的 Quenching 程序,进行叶绿素荧光诱发曲线的测定,并对白术样品各个像素点的荧光参数进行计算^[18-20]。参数说明见表 2。

表 2 参数说明

参数	定义
$F_v = F_m - F_o$	可变荧光
$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$	PSII 最大光量子产量
$qP = (F_m' - F_s / F_m' - F_o')$	光化学猝灭系数
$NPQ = (F_m - F_m') / F_m' = F_m / F_m' - 1$	非光化学猝灭系数
$\Phi PSII = Y(II) = \Delta F / F_m' = (F_m' - F) / F_m'$	PSII 实际光合效率

1.2.5 扫描法测定根系参数 分别将处理 1~5 d 的种苗取出,截止处理时间结束立即进行根系扫描,将须根清洗干净,整个过程要缓慢以确保根的完整性。将清洗好的须根置于根盘内进行扫描,按照 WinRHIZO 软件操作,得到结果^[21-23]。

1.2.6 TTC 法测定根系活力 以 0、0.05、0.10、0.20、0.30 和 0.40 g·L⁻¹ 的 TTC 溶液制作 TTC 的标准曲线,在 37 ℃ 条件下,黑暗处理,2~3 h,待植株长出 4~5 片叶子,取出,轻轻洗去根部的

基质,剪下,称取 0.5 g,按 TTC 法进行根系活力测定。观察被试植株的颜色变化。以 0.4 g·L⁻¹ TTC 溶液和磷酸缓冲(pH7.0)稀释溶液作为反应溶液测试,由 TTC 的根还原力计算公式计算根的还原力^[24-25]。

1.2.7 数据分析 数据采用 Excel 2010 进行统计,采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析,采用 Origin 4.0 软件进行计算作图。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫下 SA 处理对白术形态和叶绿素荧光参数的影响

2.1.1 叶片形态 由图 1 叶片 RGB 图像可知,A 组中不同浓度处理后,1.0 mmol·L⁻¹ 的叶片生长正常,2.0 mmol·L⁻¹ 处理的叶片叶尖稍干枯,0.5 mmol·L⁻¹ 处理的叶片正常。B 组中 1.0 mmol·L⁻¹ 的叶片黄化,出现缺素症状生长正常,2.0 mmol·L⁻¹ 处理的叶片生长正常,0.5 mmol·L⁻¹ 处理的叶片有黄斑。C 组中,1.0 mmol·L⁻¹ 的叶片生长正常且长势较好,0.5 和 2.0 mmol·L⁻¹ 处理的叶片均出现不同程度的畸形。D 组中,2.0 mmol·L⁻¹ 的叶片生长正常且长势较好,0.5 mmol·L⁻¹ 出现畸形,1.0 mmol·L⁻¹ 处理的叶片稍偏小。E 组中 0.5 和 2.0 mmol·L⁻¹ 处理的叶片能正常生长,但 2 mmol·L⁻¹ 的叶片出现卷折。

2.1.2 Fv'/Fm'值 从图 2 中 5 组高温处理数据来看,喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 的白术苗,Fv'/Fm' 的值均大于 CK 组,这个结果和实物图显示的结果一致,说明喷施低浓度的 SA 后,白术苗受高温胁迫的伤害程度明显减轻,且叶片生长状态均优于 CK 组,处理组叶片的光合作用强于空白组。

图 2 中 5 组数据显示,随着处理时间的增加,CK 组的 Fv'/Fm' 的值随着处理天数的增加有下降趋势,可能是随着高温胁迫时间的增加,叶片受损伤的程度增大,光合能力减弱;而喷施不同浓度的 SA 后,处理组 Fv'/Fm' 的整体数值呈现上升趋势,且均高于 CK 组,这种变化趋势在喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 溶液的白术苗上尤为明显,数值均高于其他浓度,且在 A、B 和 D 组中与 CK 组有显著性差异。喷施 1.0 mmol·L⁻¹ 的水杨酸也展现了相似的规律,说明低浓度的 SA 对白术抗高温可以起到一定的缓解作用。2.0 mmol·L⁻¹ 水杨酸对白术幼苗的叶片有损伤。所以,从 Fv'/Fm' 的结果分析显示,喷施 0.5 mmol·L⁻¹ 的 SA 溶液对白术抗高温效果最好。

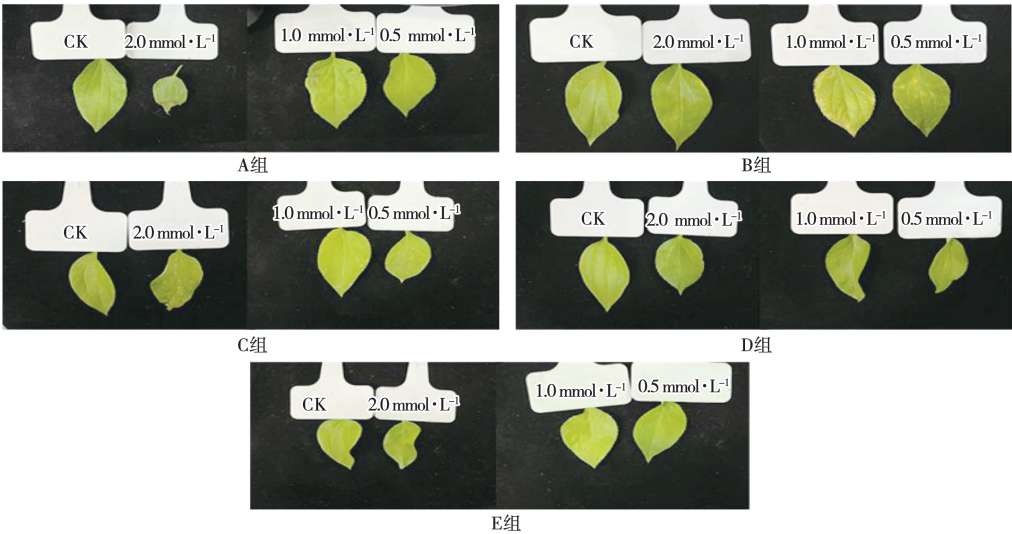


图 1 高温胁迫下不同 SA 处理白术叶片实物图

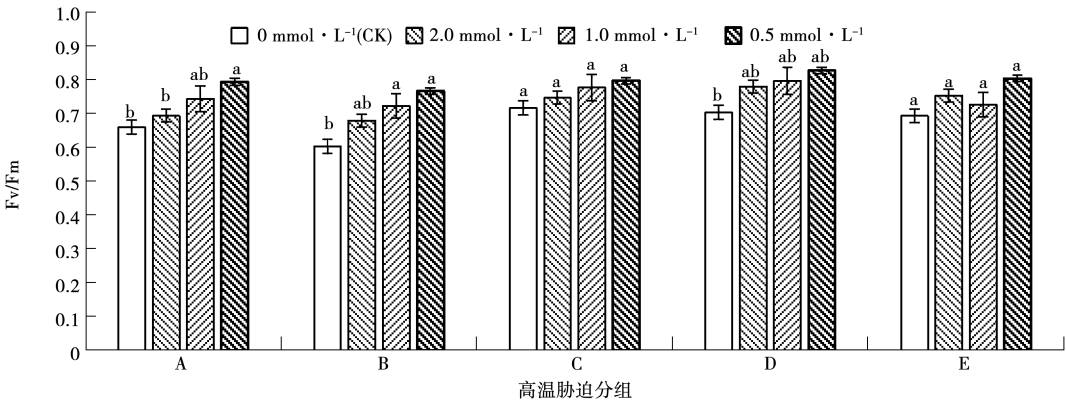


图 2 高温胁迫下 SA 处理对白术 Fv/Fm 的影响

注:不同大、小写字母分别表示同高温胁迫组中不同 SA 浓度间在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

2.1.3 $\Phi PSII$ 值 由图 3 中 5 组高温处理数据来看, $\Phi PSII$ 的值均大于 CK 组, 这个结果和实物图显示的结果一致, 说明喷施低浓度的 SA 后, 白术苗受高温胁迫的伤害程度明显减轻, 且叶片生长状态均优于 CK 组, 并且随着处理时间的增加, CK 组的 $\Phi PSII$ 值有逐渐下降的趋势, 可能是随着高温胁迫

时间的增加, 叶片受损伤的程度增大, 光合能力减弱; 喷施 0.5, 1.0 及 2.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 的 SA 溶液能明显符合上述规律, 但 1.0 和 2.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 的 SA 溶液抗高温胁迫能力较 0.5 $mmol \cdot L^{-1}$ 略差。所以, 从 $\Phi PSII$ 的结果分析显示, 喷施 0.5 $mmol \cdot L^{-1}$ 的 SA 溶液效果最好。

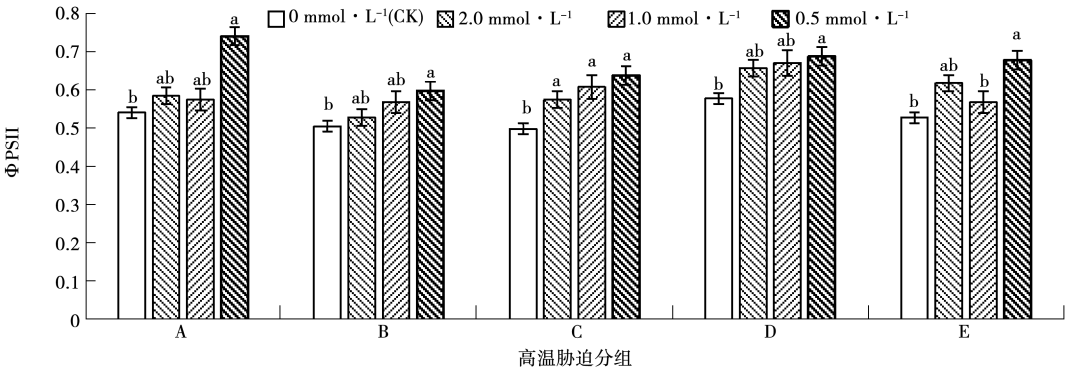


图 3 高温胁迫下 SA 处理对白术 $\Phi PSII$ 的影响

2.1.4 NPQ 值 由图 4 中 5 组试验结果可以看出,高温胁迫下 CK 组 NPQ 值均大于处理组,说明处理组中 SA 起到了一定的保护作用,光合能力增大,热能耗散就会减少,NPQ 值降低。CK 组相较于处理组,NPQ 值较高,可能是由于 CK 组受到高温胁迫,损害严重,植物通过耗散更多自身的热能进行自我保护。A 组 CKNPQ 值最小,可能植物的组织结构被损伤,处理组的数值随着胁迫时间的增加没有明显差异变化,但是整体呈现下

降的趋势,其中喷施低浓度 SA 的数据偏低,说明抗高温胁迫效果较好。这与 F_v'/F_m' 和 $\Phi PS II$ 的数据变化规律一致。0.5 mmol·L⁻¹ SA 的预处理对提高白术种苗在高温胁迫下的缓冲效果是最好的,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 也能起到相同的作用。但是,更低浓度的 SA 溶液能否提高白术种苗在高温胁迫下的缓冲能力有待进一步试验验证。

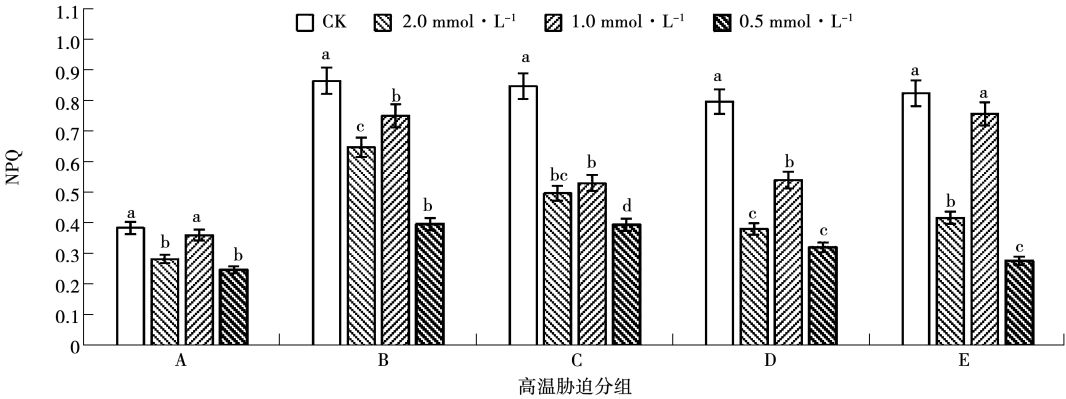


图 4 高温胁迫下 SA 处理对白术 NPQ 的影响

2.2 高温胁迫下 SA 处理对白术叶绿素荧光成像的影响

2.2.1 F_v'/F_m' 由图 5 可知,叶片显出的颜色越深就代表此参数的值越大,也代表了光合能力越强。A 组中,由于高温胁迫对白术种苗的损害较大,死苗较多,导致 A 组的取样不具有代表性,

所以 A 组数据误差可能较大。BCDE 4 组中,CK 的叶片颜色都偏蓝色,而喷施 0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ SA 的叶片都比较红,说明处理组实际光合效率比 CK 组更高,与柱状图的数据规律一致。说明喷施低浓度 SA 溶液的白术幼苗要比 CK 组的光合能力强。

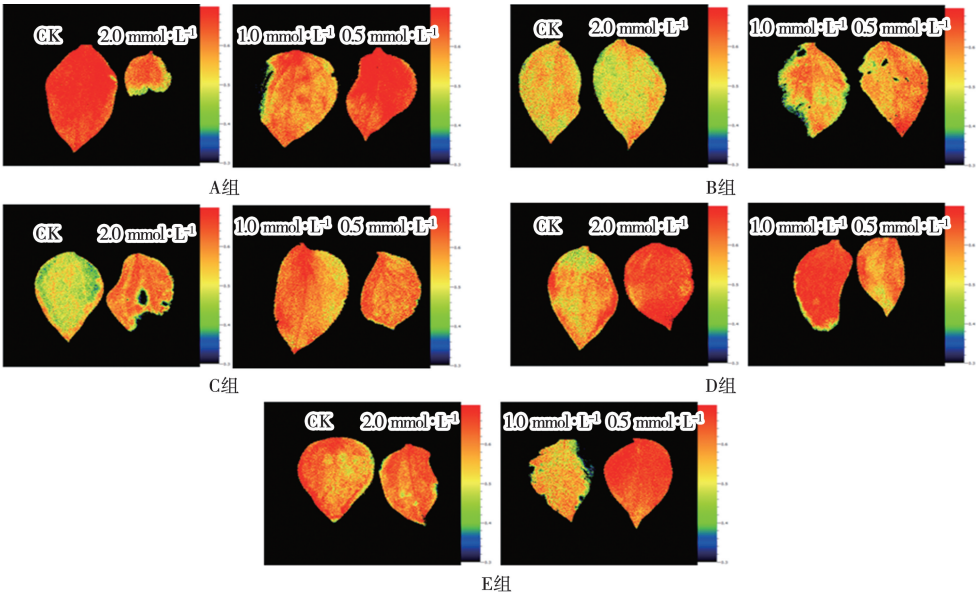


图 5 白术叶片荧光成像 F_v'/F_m' 的图片

2.2.2 ΦPSⅡ 通过分析 5 组数据,发现 ΦPSⅡ 与 Fv'/Fm' 的叶片成像规律基本一致。BCDE 中,喷施低浓度 SA 的白术叶片颜色要比 CK 组

叶片更偏红色,说明数值更大一些,而喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 更为明显(图 6)。

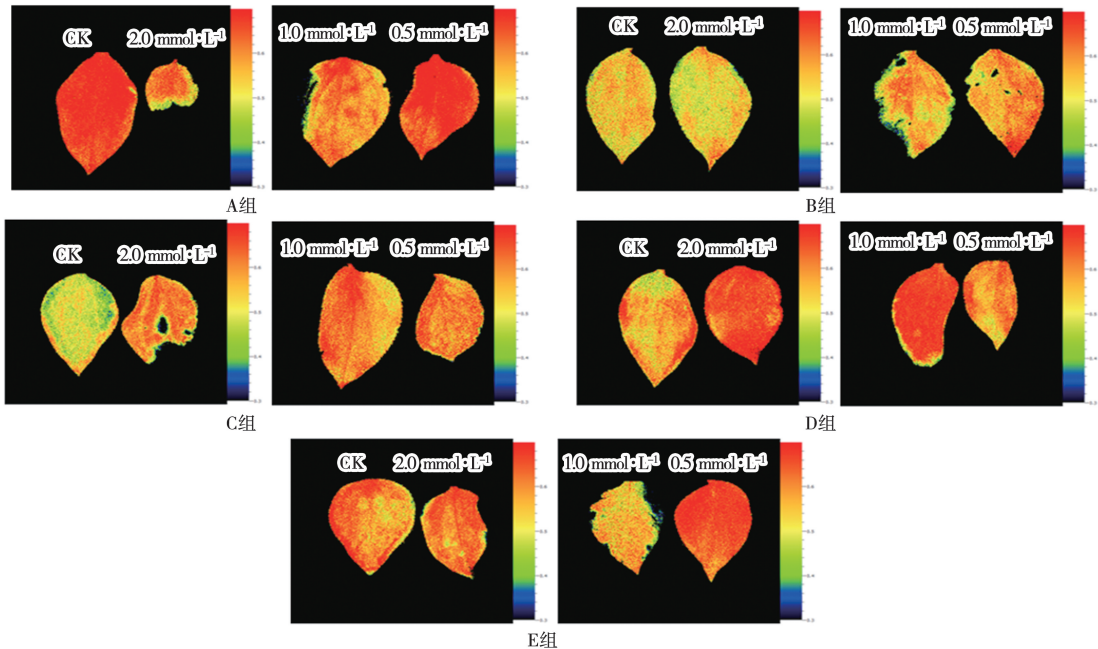


图 6 白术叶片荧光成像 ΦPSⅡ 的图片

2.2.3 NPQ 通过比较 5 组的 NPQ 值,发现 CK 组的 NPQ 值最大,而喷施 0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ SA 溶液的处理组整体都偏深蓝色甚至黑色,说明 CK 组的热能耗散量要比处理组高很多,高温胁迫的严重损伤导致 CK 组的光合效率降低。与柱

状图数据呈现出的规律是一致的(图 7)。综合分析,荧光成像结果与荧光参数基本可以一一对应,喷施 0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ SA 溶液能有效减弱高温胁迫对白术种苗的伤害作用。

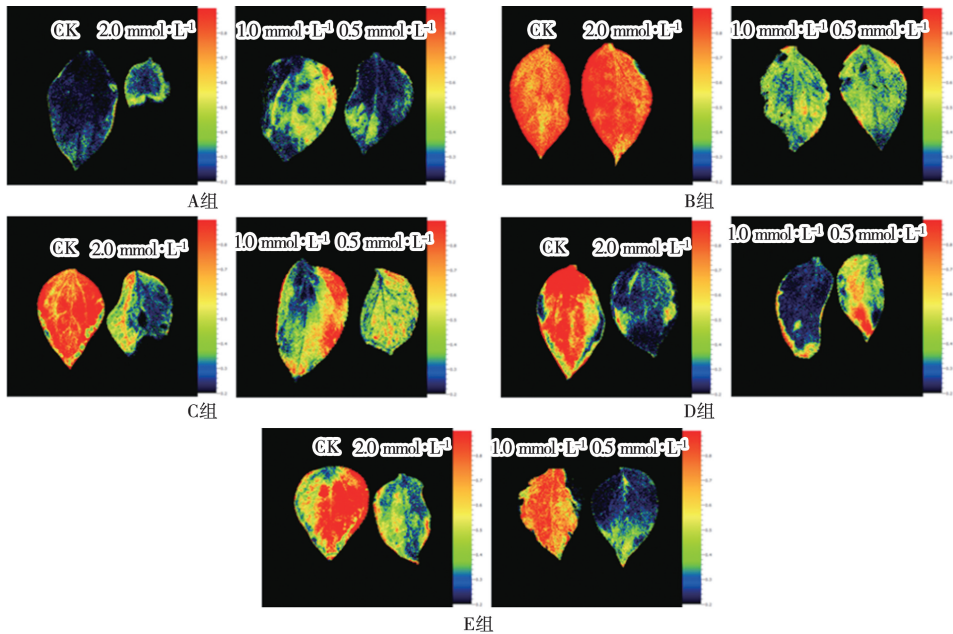


图 7 白术叶片荧光成像 NPQ 的图片

2.3 高温胁迫下 SA 处理对白术根系生长特征的影响

2.3.1 根长 水杨酸处理高温胁迫下白术种苗根生长的测定结果显示,喷施 0.5,1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 后,综合 ABCDE 5 组数据分析,喷施 1.0 mmol·L⁻¹

SA 时白术种苗的根系长度相对 CK 组分别提高了 279.95%、140.03%、24.67%、10.18% 和 152.29%, 并与另外两个浓度间具有显著性差异,可知喷施 1.0 mmol·L⁻¹ 用 SA 时能促进白术幼苗的根长生长,而且处理 A 组的结果最高(表 3)。

表 3 高温胁迫下 SA 对白术根系结构根长的影响

SA 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根长/cm				
	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
0(CK)	31.67±2.03 d	28.33±1.45 c	100.00±3.46 c	154.00±4.16 a	79.67±3.18 b
0.5	100.00±4.62 b	25.33±2.03 c	59.67±3.18 d	75.00±3.46 b	39.67±1.45 c
1.0	120.33±2.60 a	68.00±3.21 a	124.67±5.48 a	169.67±9.60 a	201.00±8.96 a
2.0	45.00±2.89 c	39.67±1.45 b	120.00±2.31 b	149.33±7.51 a	89.67±2.60 b

注:同列数据后不同大、小写字母分别表示同一组中不同 SA 浓度间在 P<0.01 和 P<0.05 水平差异显著。下同。

2.3.2 根系投影面积 水杨酸处理高温胁迫下白术种苗根系投影面积测定结果显示,喷施 0.5, 1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 后,综合 ABCDE 5 组数据分析,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 时白术种苗的根系投影面积相对 CK 组分别提高了 493.51%、83.92%、

42.15%、21.50% 和 176.47%, 并与另外两个浓度间具有显著性差异,可见喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 时能促进白术幼苗的根系投影面积增大,而且在处理 A 组的结果最高(表 4)。

表 4 高温胁迫下 SA 对白术根系结构投影面积的影响

SA 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根系投影面积/cm ²				
	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
0(CK)	0.77±0.03 c	1.43±0.03 d	2.23±0.09 b	3.07±0.13 b	1.53±0.09 bc
0.5	3.20±0.12 b	1.03±0.07 c	1.77±0.09 c	2.27±0.09 c	1.33±0.15 c
1.0	4.57±0.15 a	2.63±0.15 a	3.17±0.15 a	3.73±0.20 a	4.23±0.20 a
2.0	0.90±0.58 c	1.77±0.03 b	3.00±0.17 a	3.00±0.12 b	1.80±0.06 b

2.3.3 根系表面积 水杨酸处理高温胁迫下白术种苗根系表面积的测定结果显示,喷施 0.5, 1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 后,综合 ABCDE 5 组数据分析,喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 时白术种苗的根系表面积相对 CK 组分别提高了 5.88%、41.18%、

30.43%、50.00% 和 30.77%, 并与另外两个浓度间具有显著性差异(除 A 组 1.0 mmol·L⁻¹ 外), 可见喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 时能促进白术幼苗的根系表面积增大,而且在处理 D 组的结果最高(表 5)。

表 5 高温胁迫下 SA 对白术根系结构表面积的影响

SA 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根系表面积/cm ²				
	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
0(CK)	0.34±0.01 ab	0.34±0.01 c	0.23±0.01 b	0.20±0.01 c	0.26±0.01 b
0.5	0.36±0.01 a	0.48±0.01 b	0.30±0.01 a	0.30±0.01 a	0.34±0.01 a
1.0	0.33±0.01 ab	0.26±0.01 d	0.24±0.01 b	0.25±0.01 b	0.20±0.01 c
2.0	0.31±0.01 c	0.43±0.01 a	0.25±0.01 b	0.19±0.01 c	0.22±0.01 c

2.3.4 根系平均直径 水杨酸处理高温胁迫下白术种苗根系平均直径的测定结果显示,喷施 0.5, 1.0 和 2.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 后,综合 ABCDE 5 组数据分析,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 时白术种苗的根系表面积相对 CK 组分别提高了 492.00%、280.95%、

26.27%、12.75% 和 175.00%, 并与另外两个浓度间具有显著性差异,可见喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 时能促进白术幼苗的根系平均直径增大,而且在处理 A 组的结果最高(表 6)。

表 6 高温胁迫下 SA 对白术根系结构平均直径的影响

SA 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根系平均直径/cm				
	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
0(CK)	2.50±0.12 c	2.10±0.06 d	7.50±0.29 b	10.20±0.35 ab	4.80±0.23 bc
0.5	10.20±0.46 b	3.20±0.12 c	5.40±0.12 c	7.60±0.35 c	4.00±0.17 c
1.0	14.80±0.58 a	8.00±0.12 a	9.47±0.43 a	11.50±0.58 a	13.20±0.64 a
2.0	3.00±0.12 c	5.37±0.20 b	9.20±0.29 a	9.80±0.40 b	5.50±0.29 b

2.3.5 根系形态 从根系扫描图可以看出,每组的根系测量结果与上述根长、表面积、投影面积和平均直径的测定结果相吻合(图 8)。

综合分析,喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 对高温胁

迫下白术种苗根系表面积能起到促进作用,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 能促进根长、投影面积及平均直径。

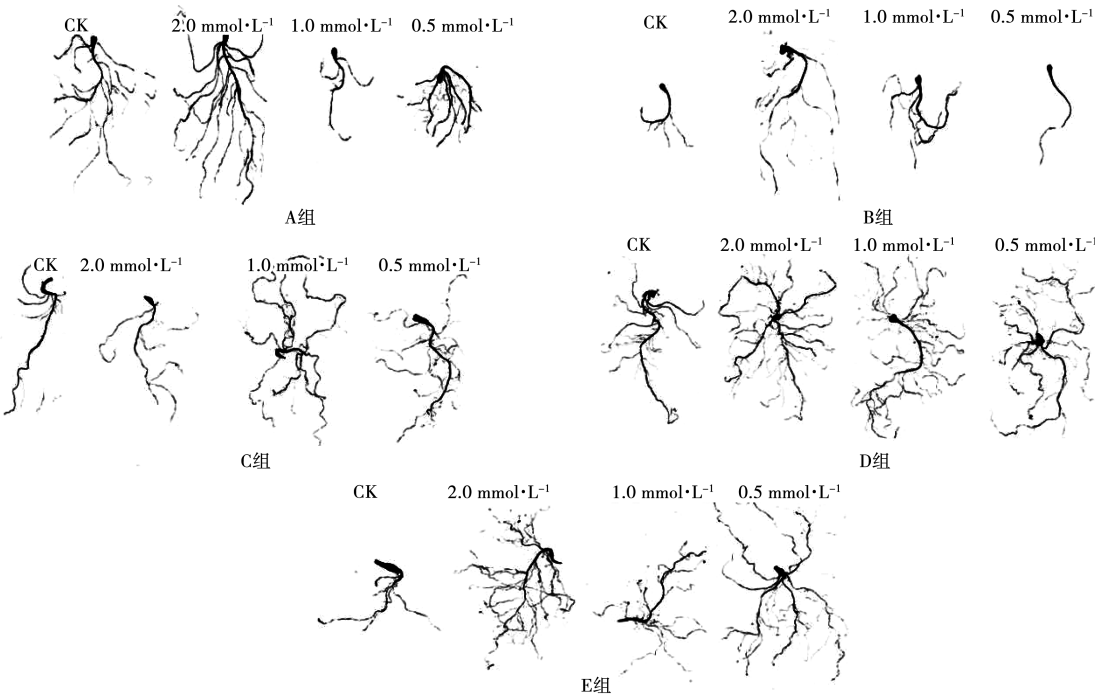


图 8 白术根系扫描实物图

2.4 高温胁迫下 SA 处理对白术根系活力的影响

由表 7 可知,各 SA 处理组的根系活力数据均大于 CK 组。在 ABCE 4 组中,喷施 1.0 mmol·L⁻¹ SA 溶液的白术种苗根系活力的数值最高,其次是喷施 0.5 mmol·L⁻¹ SA 溶液;说明低浓度水杨酸溶液的预处理可以增强在高温胁迫下白术根系

的耐热力和自我保护能力。而喷施 2.0 mmol·L⁻¹ SA,白术种苗的根系活力状态未达到想要的处理效果,原因可能是 SA 浓度过大,加重了种苗根系受胁迫的损伤。综合分析,5 组不同天数间的数据基本呈现一致的规律,喷施 0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的 SA 溶液对高温胁迫下的白术种苗的根系活力均有促进作用。

表 7 高温胁迫下 SA 对白术根系活力的影响

SA 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	根系活力				
	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
0(CK)	0.019±0.001 d	0.010±0.001 c	0.068±0.001 b	0.020±0.001 c	0.105±0.001 a
0.5	0.040±0.001 b	0.010±0.001 c	0.060±0.001 c	0.030±0.001 a	0.110±0.006 a
1.0	0.050±0.006 a	0.180±0.005 a	0.075±0.001 a	0.025±0.001 b	0.112±0.001 a
2.0	0.025±0.001 c	0.050±0.001 b	0.070±0.002 ab	0.020±0.001 c	0.108±0.001 a

3 讨论

高温胁迫引起植物的生理损伤,导致植物外部形态和内部结构及生理生化方面发生相应的变化^[26],从而引起植物生长发育受损伤。水杨酸作为一种新型的外援激素,能提高植物对高温胁迫的生物抗性。外施水杨酸能引起抗氧化酶活性的提高,显著避免代谢系统的氧化损伤,叶片的叶绿素荧光参数发生较大的变化。

本研究中,高温胁迫是导致白术种苗生产过程中死亡的主要诱因。通过研究发现,施加不同浓度的水杨酸后经同等程度的高温胁迫,白术苗的叶片形态、叶绿素荧光参数如: F_v'/F_m' 值、 $\Phi PS II$ 、NPQ 值,根系活力及形态参数都发生了不同的变化。未经水杨酸处理的白术种苗的叶片形态多干枯或畸形,经水杨酸处理后,白术叶片的 F_v'/F_m' 值、 $\Phi PS II$ 均高于 C 组,而 NPQ 值则显著低于空白组,这与 Baker^[27] 的结论一致:部分胁迫下植物的 NPQ 会上升以提高应对胁迫的能力,但胁迫程度过强,也可能直接使 NPQ 降低。 F_v'/F_m' 是 PS II 光适应最大光量子产量,光适应状态下测得,反映 PSII 活性中心初始光能俘获效率的形式,其值的大小直接反映了目标光合能力的强弱; $\Phi PS II$ 是指 PS II 的实际光量子效率(实际光合效率),反映部分关闭的 PS II 反应中心原初光能捕获效率,其值的大小同样反映了作物光合能力的强弱。NPQ 是稳态非光化学荧光淬灭,反映 PS II 所吸收的光能无法被利用来进行光合作用中的电子转移,而是以热能的方式被消耗掉,这是一种自卫机制^[28]。

根系在植物的生命过程中扮演着十分重要的角色。它作为最重要的地下营养器官来吸收所需要的养料和水分。根系的良好生长利于幼苗吸收水分来抵抗高温胁迫下造成植物缺水的情况。

通过根系扫描和根系活力测定发现,经高温胁迫后外施 SA,白术种苗根的长度、直径、投影面积、表面积及根系活力都出现不同程度的增加。尤其是喷施 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 溶液对白术种苗的根系长度、投影面积和根系直径影响最大, $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 溶液对白术种苗根系直径影响最大,对白术根系活力均有很好的促进作用。

综合叶片荧光参数和根系指数等指标,高温胁迫下施加 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SA 对提高白术叶片的光合能力、光合效率以、根系活力及自我保护

能力作用较好。此结论为研究白术的抗逆性提供了数据基础。但高温胁迫的程度及生理活性指标还需进一步的试验验证。

4 结论

高温胁迫下 SA 溶液会降低白术 NPQ 使 F_v'/F_m' 和 $\Phi PS II$ 值升高,且喷施 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SA 溶液效果最为显著。高温胁迫后喷施 1.0 和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA 溶液对白术种苗的根系长度、表面积和投影面积影响最大。综上高温胁迫下施加 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SA 对提高白术叶片的光合能力、光合效率、根系活力及自我保护能力作用较好,缓解高温对白术苗伤害的能力最强。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部(2020 年版) [M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:107.
- [2] 张景云,赵晓东,万新建,等. 小白菜耐热性鉴定及其耐热性分析[J]. 核农学报,2014,28(1):146-153.
- [3] 刘大林,张华,曹喜春,等. 夏季高温胁迫对紫花苜蓿光合生理机制的影响研究[J]. 草地学报,2014,22(3):657-660.
- [4] 杨华庚,颜速亮,陈慧娟,等. 高温胁迫下外源茉莉酸甲酯、钙和水杨酸对蝴蝶兰幼苗耐热性的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(28):150-157.
- [5] 李天来,李森,孙周平. 钙和水杨酸对亚高温胁迫下番茄叶片保护酶活性的调控作用[J]. 应用生态学报,2009,20(3):586-590.
- [6] 曹淑红,李宇毅. 水杨酸对高温胁迫下百日草幼苗耐热性的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2014,45(1):91-94.
- [7] 张金政,张起源,孙国峰,等. 干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响[J]. 草业学报,2014,23(1):167-176.
- [8] 吴长艾,孟庆伟,邹琦,等. 小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究[J]作物学报,2003(3):339-344.
- [9] PETERSON R B, SIVAK M N, WALKER D A. Relationship between steady-state fluorescence yield and photosynthetic efficiency in spinach leaf tissue[J]. Plant Physiology, 1988, 88(1):158-163.
- [10] RALPH P J, MACINNIS-NG CMO, FRANKART C. Fluorescence imaging application; effect of leaf age on seagrass photokinetics[J]. Aquatic Botany, 2005, 81(1):69-84.
- [11] 樊大勇,付增娟,谢宗强,等. 调制式荧光影像新技术:叶片内部最大光化学量子效率及其异质性的活体测定[J]. 植物生态学报,2016,40(9):942-951.
- [12] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 313-349.
- [13] DONG Z F, MEN Y H, LI Z M, et al. Chlorophyll fluorescence imaging as a tool for analyzing the effects of chilling injury on tomato seedlings [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 490-497.

- [14] 郑坚,陈秋夏,金川,等.不同 TTC 法测定枫香等阔叶树容器苗根系活力探讨[J]. 浙江农业科学,2008,49(1):39-42.
- [15] 苏柏予,张维仕,王友绍.三种红树根部组织抗氧化酶活性对水淹胁迫的响应[J]. 热带海洋学报,2022,41(6):35-43.
- [16] 张青侠,徐金光,鲍明月,等.水涝胁迫对芍药根系形态及体内多胺含量的影响[J]. 植物生理学报,2020,56(7):1445-1457.
- [17] 祝连彩,唐士金,周丽.考马斯亮蓝 G 250 法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探讨[J]. 教育教学论坛,2020(23):266-269.
- [18] 梁行行,陈爽,赵冰,等.7 种灌木幼苗耐淹性比较研究[J]. 西北林学院学报,2020,35(3):61-67.
- [19] 田计均,唐媛,董雨,等.水分胁迫对不同发育时期藜麦生理的影响[J]. 生物学杂志,2020,37(6):73-76.
- [20] 张涛,马肖静,朱新红,等. NaCl 胁迫对不同耐盐性辣椒幼苗生理生化指标的影响[J]. 山东农业科学,2021,53(12):38-43.
- [21] 周武先,熊琳珂,罗孝荣,等.不同配比基质对白术幼苗生长及生理特性的影响[J]. 北方园艺,2021(18):111-118.
- [22] 苏冉,杜文秀,王智威,等. NaCl 对百脉根幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学,2021,53(8):48-53.
- [23] 张苗,陈伟,徐丽萍,等.基质栽培与土壤栽培对奶白菜生长及栽培介质中微生物区系的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1265-1273.
- [24] 冷芬,杨在君,吴一超,等.土壤 pH 值对何首乌生理及其光合特性和有效成分含量的影响[J]. 西北植物学报,2020,40(9):1566-1573.
- [25] AIEN A, CHATURVEDIA K, BAHUGUNA R N, et al. Phenological sensitivity to high temperature stress determines dry matter partitioning and yield in potato[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2017, 22(1):63-69.
- [26] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报,1999,16(4):444-448.
- [27] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59:89-113.
- [28] ROHÁČEK K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships [J]. Photosynthetica, 2002, 40(1):13-29.

Effects of Salicylic Acid on Physiological Characteristics of *Atractylodes macrocephala* Under High Temperature Stress

LI Gang^{1,2}, LI Jingqi¹, WEI Qinghong², DUAN Weiwei³, CHEN Na¹

(1. Joint Research Center for Chinese Herbal Medicine of Anhui of IHM, Bozhou Vocational and Technical College, Bozhou 236800, China; 2. Key Laboratory of Anhui Province for New Technology of Chinese Herbal Decoction Pieces Manufacturing, Bozhou 236800, China; 3. Anhui Xiehecheng Co. Ltd, Bozhou 236800, China)

Abstract: In order to explore the mitigation effect of salicylic acid (SA) on *Atractylodes tylose* seedlings under high temperature stress, and to select the optimal SA concentration suitable for alleviating high temperature stress injury. The effects of 3 different concentrations of SA solutions, including 0.5 mmol L⁻¹, 1.0 mmol L⁻¹ and 2.0 mmol L⁻¹, and different degrees of high temperature treatment on the chlorophyll fluorescence parameters, root scanning parameters and root vitality of the leaves were studied. The result showed that, in terms of Fv'/Fm', ΦPII and NPQ measured by chlorophyll fluorescence, the NPQ values of blank group were higher than those of treatment group under high temperature stress, while the Fv'/Fm' and ΦPII values of blank group were lower than those of treatment group, and the SA solution sprayed with 0.5 mmol L⁻¹ had the most significant effect compared with the control group. Spraying 0.5 mmol L⁻¹ SA could promote the root surface area of the seedlings under high temperature stress, and the promoting effect of spraying 1.0 mmol L⁻¹ SA was more significant in terms of root length, projected area and average diameter. The highest value of root activity was found in the seedlings sprayed with 1.0 mmol L⁻¹ SA solution. In conclusion, the SA of 0.5 mmol L⁻¹ can effectively alleviate the damage of high temperature on white surgery seedlings.

Keywords: *atractylodes macrocephala*; salicylic acid; high temperature stress; blade

著作权使用声明

本刊已许可中国知网、维普网、万方数据、博看网、长江文库、超星等知识服务平台以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

黑龙江农业科学编辑部