

# 外源 2,3-丁二醇对匍匐剪股颖耐热性的影响

赵宁<sup>1</sup>, 史毅<sup>2</sup>, 马晖玲<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 针对匍匐剪股颖(*Agrostis stolonifera*)在北过渡带不能安全越夏的问题, 本试验模拟设置人工气候热胁迫(37℃/32℃, 昼/夜), 通过喷施300 μmol/L 2,3-丁二醇(2,3-butanediol, BD), 测定分析匍匐剪股颖 Penn A4 幼苗在热胁迫第0、7、14、21、28天时叶片光合色素、细胞膜损伤程度、抗氧化酶活及渗透调节物质含量的变化, 研究外源BD对Penn A4耐热性的影响。结果表明: 常温环境下, 经BD处理的Penn A4各项生理指标较对照组无显著差异( $P>0.05$ ); 高温胁迫下, 随着胁迫时间的延长, BD处理显著减缓了Penn A4叶片光合色素的降解速度( $P<0.05$ ), 有效抑制了叶片电解质外渗, 降低了丙二醛和过氧化氢含量。与高温对照相比, 外源BD提高了热胁迫下( $\leq 14$  d) Penn A4植株的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶活性, 促进了游离脯氨酸和可溶性蛋白含量的积累。叶面喷施BD通过提高胁迫前期Penn A4植株的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量, 维持了细胞膜的稳定性和活性氧的代谢平衡, 缓解了高温造成的氧化损伤, 提高了匍匐剪股颖耐热性。

**关键词:** 2,3-丁二醇; 高温胁迫; 匍匐剪股颖; 抗氧化系统; 细胞膜系统; 耐热性

**中图分类号:** S688.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2022)03-0054-09

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyyep.2022.03.007



温度是影响草坪草生长发育及生态分布的重要环境因子<sup>[1]</sup>。在我国, 草坪草应用存在北过渡带, 该地区具有夏季高温高湿, 雨热同期的气候特征<sup>[2]</sup>, 处于此地区的冷季型草坪草受高温影响导致越夏困难, 时常出现夏枯或短期休眠现象, 在表观形态方面表现为草坪质量及密度下降<sup>[3]</sup>, 细胞层面表现为植物细胞产生过量的活性氧, 导致脂质过氧化, 膜损伤, 酶紊乱甚至细胞死亡<sup>[4]</sup>, 这极大地制约了冷季型草坪草的地域发

展。因此, 提高冷季型草坪草越夏能力是亟待解决的问题。

匍匐剪股颖(*Agrostis stolonifera*)为禾本科剪股颖属冷季型草坪草, 喜冷凉湿润气候, 最适生长温度为15~24℃<sup>[5]</sup>, 对高温的反应较为敏感, 具有耐寒、耐瘠薄、耐践踏等特点<sup>[6]</sup>, 由于其匍匐茎横向蔓延能力强, 耐频繁低修剪<sup>[7]</sup>, 叶片质地细密, 绿期长, 适应性强等优良特性<sup>[8]</sup>, 被广泛应用于高尔夫球场果岭, 网球场等高质量养护水平场地和园林绿化工程。

通过喷施外源物质来调控草坪草的耐热性, 具有快速、高效的特点, 对短期内快速增强草坪草的越夏能力具有重要作用<sup>[9]</sup>。2,3-丁二醇(2,3-butanediol, BD)作为一种挥发性化合物, 常温下为无色无味的液体, 具有安全无毒等特性, 此外, 它是一种新型诱抗剂, 具有促进植物生长, 提高植物非生物胁迫抗性的作用<sup>[10]</sup>。在重金属镉、盐碱、干旱等胁迫下, 外源喷施BD可有效减缓草坪草叶片相对含水量、叶绿素含量的损失速度, 并在一定程度上提高植株氧化还原酶活

**收稿日期:** 2021-10-19; **修回日期:** 2022-01-10

**基金项目:** 甘肃农业大学学科建设基金“植物根际益生菌挥发性化合物类似物诱导匍匐剪股颖耐热性机理研究”(GAU-XKJS-2018-107); 甘肃省高等学校创新基金项目“2,3-丁二醇调控热胁迫下匍匐剪股颖绿期及植株发育的研究”(2021B-133)

**作者简介:** 赵宁(1996-), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生。

E-mail: 3293610852@qq.com

马晖玲为通信作者。

E-mail: mahl@gsau.edu.cn

性和渗透调节能力,缓解胁迫造成的氧化损伤,维持细胞膜的相对稳定性,从而提高草坪草的抗逆能力,使其能够更好地适应胁迫环境<sup>[7,10-11]</sup>。在温度方面,王振<sup>[4]</sup>研究发现在自然低温胁迫下,由于BD的存在,同源异地的秋茄(*Kandelia obovata*)幼苗呈现出不同的适应性,含BD等挥发性物质的植株对低温的适应性更强,氧化还原酶活性更高,说明BD能提高秋茄幼苗对低温胁迫的耐受性。在高温胁迫方面,史毅<sup>[11]</sup>研究报道了BD对草坪草热胁迫的耐受性有显著增强作用。

本研究以匍匐剪股颖 Penn A4(*Agrostis stolonifera* 'Penn A4')为材料,在室内盆栽条件下,于苗期喷施特定浓度的BD溶液,测定高温胁迫下 Penn A4 植株生理生化指标的变化,初步探讨BD对匍匐剪股颖耐热性的影响,为生产上应用外源BD提高冷季型草坪草适应过渡带地区气候特征提供理论依据和技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料选用匍匐剪股颖 Penn A4,千粒重为0.065~0.076 g,由北京克劳沃草业技术开发公司提供,产地为美国。供试试剂为2,3-丁二醇(主要成分为2,3-丁二醇,醇类试剂),购于山东西亚化工科技有限公司。

### 1.2 试验设计

1.2.1 种苗培育 先准确称取20 g匍匐剪股颖 Penn A4 种子,蒸馏水浸泡24 h后,用70%乙醇溶液处理1 min,再用20%的次氯酸钠溶液处理20 min,无菌水冲洗残液,处理完的种子自然晾干,备用。细沙和营养土以2:1比例的沙土混合物为基质,经150℃烘箱处理8 h,自然冷却,备用。

将灭菌后的种子按每盆1.7 kg/m<sup>3</sup>均匀播于小花盆中(长10 cm×宽10 cm×高12 cm),置于温度为23℃昼/20℃夜,光周期为16 h光照/8 h黑暗,光照强度2000 lx、相对湿度为50%的培养室中培养,每天喷施蒸馏水,出苗14 d起,每周留茬高度2 cm,修剪后喷施1/2 Hoagland 营养液,40 d后进行如下处理。

1.2.2 BD及高温处理 试验共设定常温对照(H<sub>2</sub>O)、常温丁二醇(BD)、高温对照(H<sub>2</sub>O-H)、高温丁

二醇(BD-H)4个处理。植株生长40 d后随机选取1/2盆栽,作为BD处理组,叶面喷施BD溶液(浓度为300 μmol/L),每盆约15 mL,每天1次,连续处理3 d;1/2盆栽为对照组,喷施蒸馏水,每盆约15 mL,每天1次,连续处理3 d。随后将上述BD处理组和对照组分别随机平均分成两组,一组仍置于23℃昼/20℃夜,光周期为16 h光照/8 h黑暗的组培室中培养,为常温对照和常温丁二醇处理;另一组移至以37℃昼/32℃夜为高温胁迫的植物培养箱中培养28 d,为高温对照和高温丁二醇处理。胁迫期间丁二醇处理组种苗每隔14 d喷施BD溶液(300 μmol/L),蒸馏水处理组种苗喷施蒸馏水。分别于热胁迫第0、7、14、21、28天进行采样,采取供试种苗叶片进行相关生理指标的测定,每处理每指标3个生物学重复。

### 1.3 测定内容及方法

1.3.1 植株表观形态观察 试验期间每天对各处理下的植株生长状况进行观察,并于每周采样完成后随机挑选1盆各处理下的 Penn A4 盆栽,以黑布为背景,整齐摆放为一排用手机拍照记录。

1.3.2 光合色素含量测定 取0.1 g新鲜植物叶片,用95%的乙醇溶液遮光浸泡24 h,然后分别在470、649和665 nm波长下测定吸光度值。根据公式计算总叶绿素(Chlorophyll, Chl)、类胡萝卜素(Carotenoids, Car)含量和叶绿素 a/b(Chlorophyll a/b, Chla/b)值<sup>[12]</sup>。

1.3.3 细胞膜透性测定 用浸泡法<sup>[12]</sup>测定相对电导率(Relative conductivity, REC);用硫代巴比妥酸法<sup>[12]</sup>测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量;用碘化钾分光光度法<sup>[13]</sup>测定过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量。

1.3.4 抗氧化酶活性测定 采用氮蓝四唑法<sup>[12]</sup>测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD);采用愈创木酚法<sup>[12]</sup>测定过氧化物酶(Peroxidase, POD);采用紫外分光光度计法<sup>[14]</sup>测定抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX);采用紫外分光光度计法<sup>[12]</sup>测定谷胱甘肽还原酶(Glutathione reductase, GR)。

1.3.5 渗透调节物质含量测定 采用酸性茚三酮比色法<sup>[12]</sup>测定游离脯氨酸(Free proline, Pro)含量;采用考马斯亮蓝染色法<sup>[12]</sup>测定可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件对所测数据统计分析,用平均值和标准误表示测定结果,分别对同一时间点不同处理进行单因素 ANOVA 方差分析,并用 Duncan 法对各测定数据进行多重比较。采用 Excel 2010 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 BD 对高温胁迫下 Penn A4 植株叶绿素降解的影响

对 Penn A4 植株形态观察发现(图 1),不同处理组植株叶片鲜绿程度随生长时间逐渐降低。常温组

植株较高温组保持更旺盛的生长状态,处理组间无明显差异。高温组植株则生长迟缓,叶片发黄枯萎,且随胁迫程度的加深,枯萎症状更明显,与对照组相比,经 BD 处理后 Penn A4 叶片长势明显较旺盛,覆盖率更高,叶色鲜绿,有光泽。

与植株形态表现相对应,各处理下的 Penn A4 叶片总叶绿素呈持续下降趋势(图 2-A)。常温下处理组间 Chl 无显著性差异( $P>0.05$ )。热胁迫环境下 Chl 下降幅度更大,与图 1 叶片鲜绿程度相一致,外源喷施 BD 后 Chl 下降幅度显著小于对照( $P<0.05$ ),并与常温组无显著差异,14~21 d,Chl 含量分别高出对照 14.36%、20.90%。

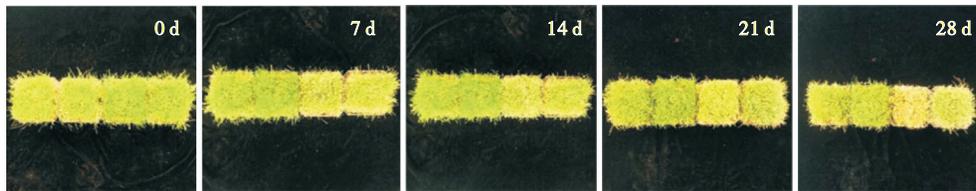


图 1 高温胁迫下 Penn A4 表现形态

Fig. 1 The effect of BD on the morphology of Penn A4 under high temperature stress

注:每张图从左到右依次代表 H<sub>2</sub>O、BD、H<sub>2</sub>O-H、BD-H

Car 含量始终低于 Chl 含量并随胁迫时间延长呈短暂升高后降低趋势,胁迫 7 d 时 Car 含量最高。常温下处理组间 Car 无明显差异。高温处理 14~21 d, BD 组 Car 显著高于对照且与常温组无差异,并分别高于

对照 13.89%、20.83%(图 2-B)。

各处理下 Chla/b 值均在 21 d 时最低。正常温度下 Penn A4 叶片 Chla/b 变化幅度较小,处理组间差异不显著( $P>0.05$ )。热胁迫下 Chla/b 始终低于常温水

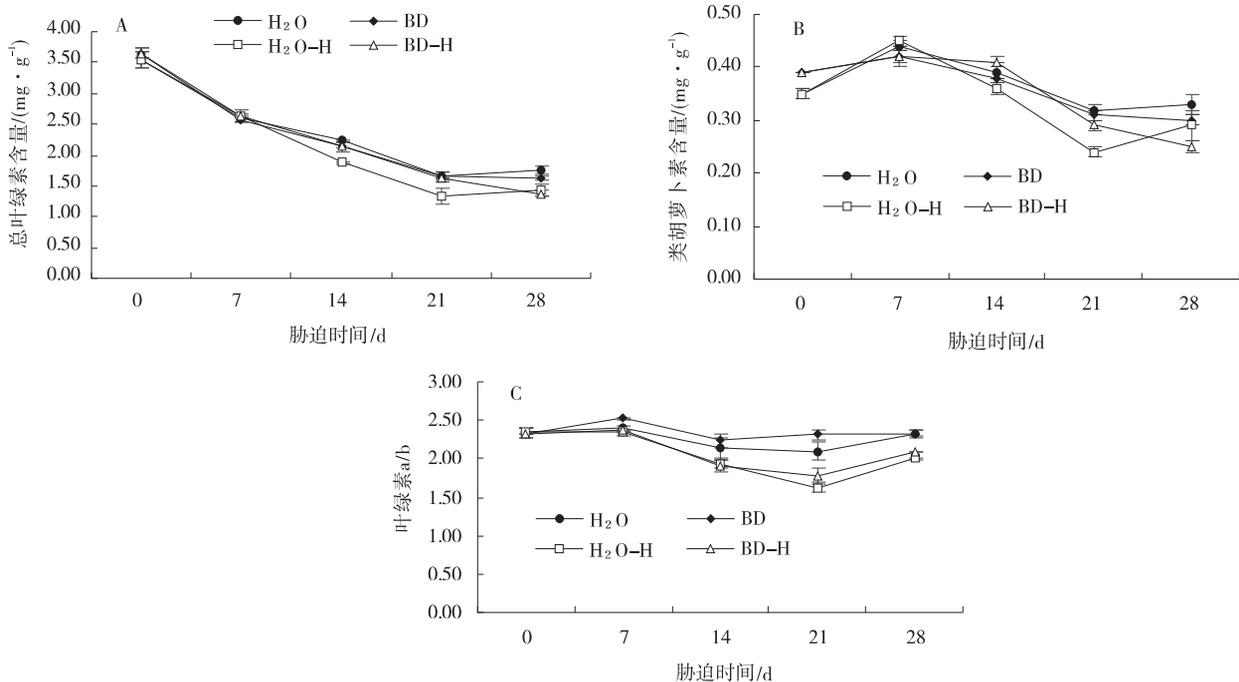


图 2 高温胁迫下 Penn A4 叶片光合色素含量

Fig. 2 The effect of BD on the photosynthetic pigment content of Penn A4 leaves under high temperature stress

平,经 BD 处理后 Chla/b 高于对照 ( $\geq 14$ d),21~28 d 内分别高于对照 9.20%、4.50%(图 2-C)。

## 2.2 BD 对高温胁迫下 Penn A4 细胞膜稳定性的影响

Penn A4 叶片 REC 呈持续上升趋势,28d 时 REC 最高。常温下 REC 上升幅度较小,两处理组变化趋势

相一致。高温下对照组 REC 自胁迫初期开始始终高于常温组,BD 处理后 REC 有效降低,7~14 d 内维持在常温水平,21 d 起较常温组达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),7~28 d 内,REC 分别较对照降低了 14.85%、8.95%、9.90%、14.53%(图 3-A)。

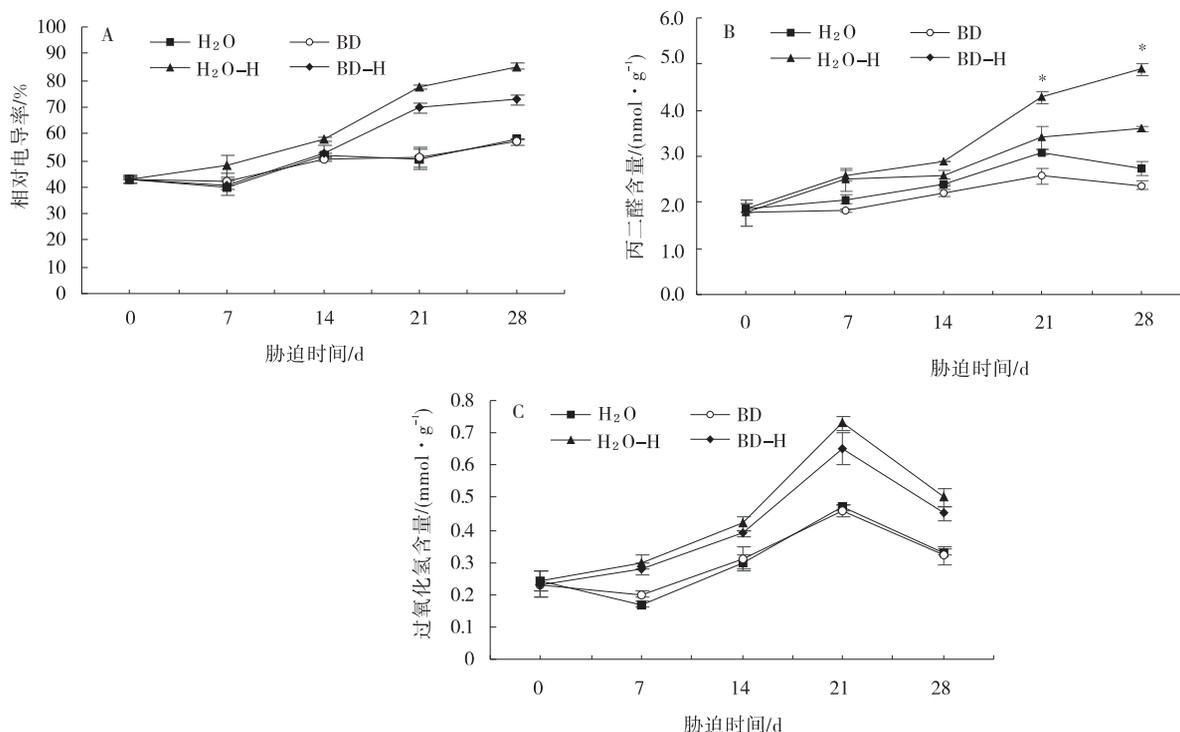


图 3 高温胁迫下 PennA4 的 REC、MDA 及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量

Fig. 3 The effect of BD on the content of REC, MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of Penn A4 under high temperature stress

植株 MDA 含量随处理时间的延长持续上升(图 3-B)。常温下处理组间 MDA 含量未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。胁迫环境下,高温促进了 MDA 的积累,BD 处理有效抑制了 MDA 的增加,且胁迫时间越长抑制效果越显著,7~28 d,MDA 分别较对照降低了 22.78%、9.72%、20.56%、26.43%。

PennA4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量 21 d 时达到峰值。常温下处理组间 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 差异不显著 ( $P > 0.05$ )(图 3-C)。热胁迫下 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著积累 ( $P < 0.05$ ),外源喷施 BD 有效抑制了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的升高,7、14、21、28 d 分别较对照降低了 6.67%、7.14%、10.96%、10.00%。

## 2.3 BD 对高温胁迫下 Penn A4 抗氧化酶活性的影响

常温下 SOD 活性先升高后降低,处理组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。高温下 SOD 活性先升高后降低再升高,BD 处理显著提高了胁迫 14 d 的 SOD 活性,7~14 d 分别较对照升高了 21.11%、8.39%,14 d 后 BD 促进效果减弱(图 4-A)。

不同温度下 APX 活性呈不同变化趋势(图 4-B)。常温下 APX 活性逐渐降低,处理组间变化不显著。高温环境下 APX 活性显著升高,BD 处理进一步增强了胁迫 14 d 内的 APX 活性,7~14 d 分别较对照升高了 3.94%、13.81%。

常温生长的植株 POD 活性先上升后降低,处理组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )(图 5-A)。高温下 POD 活性随处理时间先升高后降低再升高,胁迫处理 28 d 前对照组活性与高温组差异不显著 ( $P > 0.05$ ),经 BD 处理 14 d 内 POD 活性有效升高,14 d 时 POD 活性是对照的 1.24 倍。

GR 的活性在时间梯度上呈上升趋势(图 5-B)。常温下处理组间 GR 活性差异不显著 ( $P > 0.05$ )。高温胁迫提高了 GR 活性,BD 处理进一步增强其活性 ( $\geq 14$  d),第 14 d 时,较对照显著升高 19.86% ( $P < 0.05$ )。

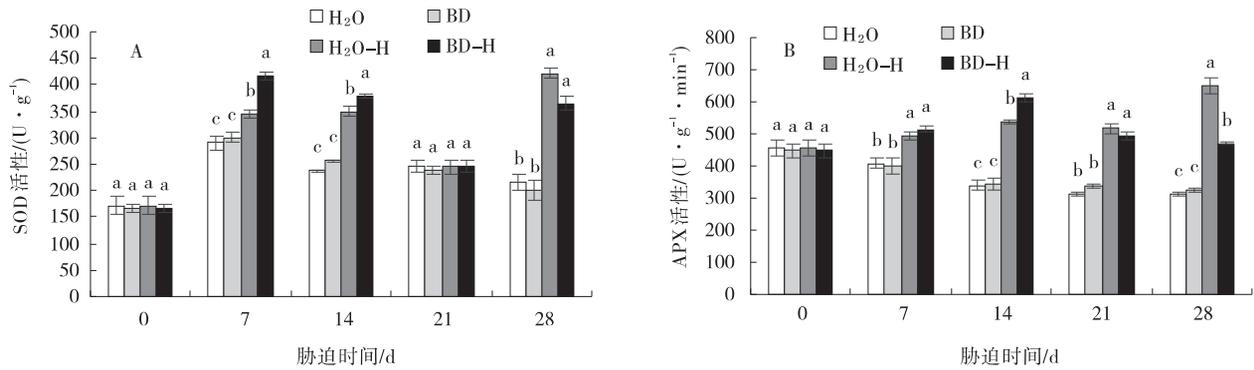


图4 高温胁迫下BD对Penn A4 SOD、APX活性的影响

Fig. 4 The effect of BD on the activities of SOD and APX of Penn A4 under high temperature stress

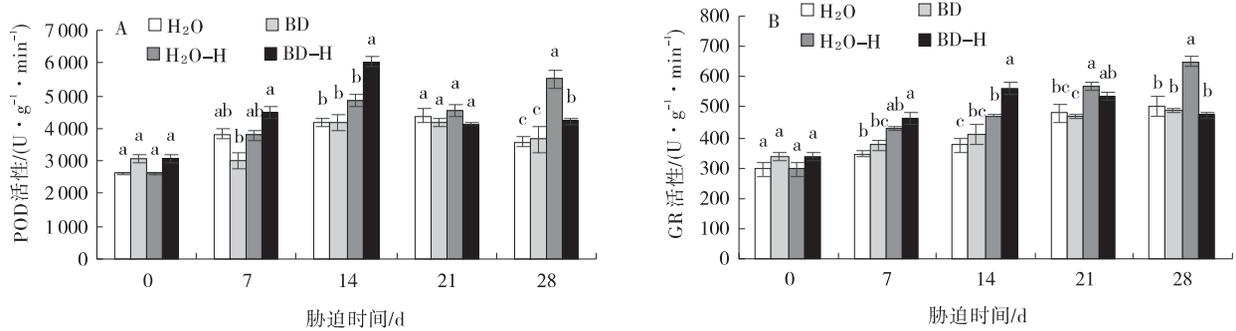
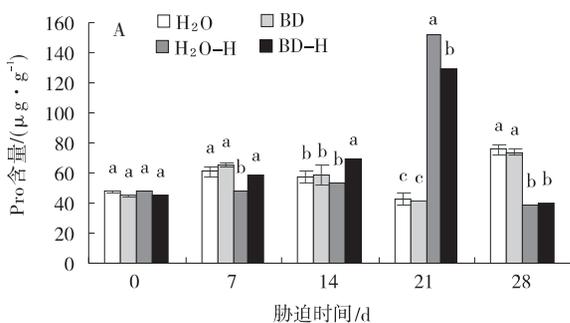


图5 高温胁迫下Penn A4的POD、GR活性

Fig. 5 The effect of BD on the activities of POD and GR of Penn A4 under high temperature stress

#### 2.4 BD对高温胁迫下Penn A4渗透调节物质的影响

常温下Pro含量基本维持在稳定水平,两处理组变化幅度基本一致。高温下Pro先升高后降低,7~14 d内,高温抑制了Pro积累,BD处理后Pro含量回升并与常温组无异,较对照分别上升22.69%、30.84%,21 d时达到峰值(图6-A)。



4种处理下,植株SP含量变化不尽相同(图6-B)。常温下SP含量呈波浪状变化,处理间变化不显著( $P > 0.05$ )。高温下SP随处理时间逐步积累,BD处理进一步提高了7~14 d的SP含量,较对照分别上升了39.45%、33.77%,14d之后BD组SP含量升高幅度低于对照。

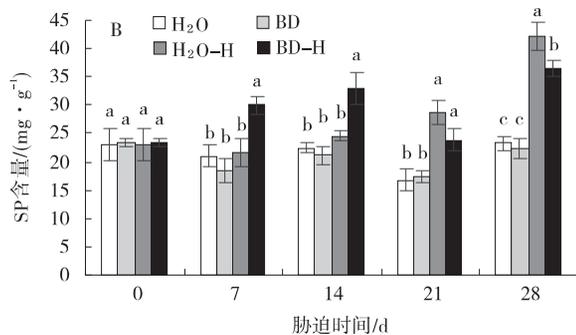


图6 高温胁迫下Penn A4的Pro、SP含量

Fig. 6 The effect of BD on the content of Pro and SP of Penn A4 under high temperature stress

### 3 讨论

#### 3.1 BD对高温胁迫下Penn A4表观形态和光合色素含量的影响

叶绿素含量可反映植物的光合能力及抗高温能力,并与叶片表观形态变化密切相关,受高温影响<sup>[15]</sup>,

在一定程度上高温会导致叶绿素生成量的减少,使其分解量大于生成量<sup>[16]</sup>,叶绿素a/b反映了植物光能的利用效率,比率越高,利用效率越高<sup>[3]</sup>。类胡萝卜素作为叶绿素的后备补充,不仅能耗散叶绿素吸收的过多光能,起到光损伤防护功能,还可以清除活性氧<sup>[17-18]</sup>。本研究中,Penn A4叶片随热胁迫时间延长逐渐萎焉

黄化,Chl、Car及Chla/b较常温水平持续降低,BD处理后,其下降幅度显著降低,叶色持绿性更久。高温下叶绿素含量降低一方面是高温影响叶绿素生物合成的中间产物氨基酮戊酸和原卟啉Ⅸ的合成,另一方面高温诱导产生的活性氧易发生氧化破坏,使内囊体膜上的叶绿素降解酶活性增强<sup>[19]</sup>。外源亚精胺抑制高温下黄瓜(*Cucumis sativus*)幼苗高能态氧化物质的形成,降低了活性氧对叶绿素氧化破坏的风险,保护类囊体结构不受损伤,并抑制了叶绿素降解酶活性升高<sup>[20]</sup>。由此我们推测BD保持了类囊体膜结构的稳定性,保护了Chl生物合成场所,并抑制了叶绿素降解酶活性升高,从而维持了胁迫环境下较高的Chl含量,还促进了Chlb向Chla的转化,最终获得了较高的光能利用率,保证了光系统Ⅱ活动的正常进行,而Car升高是为了清除热诱导产生的活性氧来进一步维持生物膜的稳定性,同样,叶面施用磷酸二氢钾和蔗糖通过提高夏季红叶桃(*Rhus chinensis*)光系统Ⅱ活性和光能转换效率提高了光合能力,但与本研究不同的是,外源物质的施用反而降低了其叶片Chl、Car含量<sup>[21]</sup>,这可能跟诱导剂类型有关。

### 3.2 BD对高温胁迫下Penn A4细胞膜稳定性的影响

质膜是活细胞与环境之间的界面与屏障,高温可直接有效地改变膜的渗透性和流动性:一方面高温改变了膜脂组成,使蛋白质变性,细胞器内膜系统的完整性被破坏,膜上离子载体的种类和功能发生改变,最终导致膜的选择性吸收功能丧失、电解质渗漏、相对电导率增加<sup>[22]</sup>;另一方面高温可诱导单线态氧、自由基、过氧化氢等活性氧累积,促使膜脂中不饱和脂肪酸脂膜过氧化为丙二醛,它能交联各类物质发生链式聚合反应,使酶蛋白失活对植物体造成伤害<sup>[23]</sup>。本研究中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>随高温呈先上升后下降的变化趋势,MDA及REL值则持续升高,外源喷施BD则有效抑制其含量的升高,研究表明,高温下外源硝普钠、 $\gamma$ -氨基丁酸的施用使茄子(*Solanum melongena*)及高羊茅(*Festuca elata*)上述指标表现出与施用BD类似的变化,主要源于外源物质提升了植物自身渗透调节能力、酶促及非酶促物质的清除功能,从而有效维持了膜系统的相对稳定性,缓解了氧化损伤,提高了植株耐热性<sup>[24-25]</sup>。因此,笔者认为,BD对膜系统的保护作用也跟渗透调节物质以及酶促物质活性有关。

### 3.3 BD对高温胁迫下Penn A4抗氧化酶活性的影响

植物在高温下受到氧化胁迫时会启动活性氧清除系统来维持细胞内环境的稳定性,抗氧化酶(SOD、POD、APX、GR等)是其抵御活性氧损伤的第一道防线。SOD是H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的生成酶,可以催化O<sub>2</sub><sup>-</sup>分解为H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>,POD能催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>与酚类的反应,从而减少活性氧的积累<sup>[26]</sup>,APX、GR也起到类似的作用<sup>[27]</sup>。本研究中,热胁迫下Penn A4各个酶活性均不同程度累积,并呈先上升后降低趋势,施加BD后酶活性进一步增强( $\geq 14$  d),其中SOD活性的谷值对应H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的峰值,APX活性始终显著高于常温组( $P < 0.05$ ),POD、GR活性变化幅度则较APX小,可见SOD酶逐渐消耗用于生成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,APX、POD和GR用于清除H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,其中APX发挥着主导作用。抗氧化酶活性不仅与物种相关,还与胁迫处理时间有关<sup>[28]</sup>,有研究报道,高温对匍匐剪股颖的抑制,前期主要是影响气孔开度,而后后期则主要是影响氧化还原酶活性<sup>[29]</sup>,樊婕等<sup>[30]</sup>发现,逆境胁迫条件下抗氧化酶活性的增加具有一定的时间效应。由此我们认为胁迫前期( $\geq 14$  d)酶促防御系统并未被激活,外源BD的干预提前活化了活性氧清除酶,从而有效缓解了前期植株的氧化损伤,而对照植株由于没有外界因素的调节活性氧随胁迫时长大量累积,少量的活性氧可作为信号分子调控细胞生长发育以及适应环境变化,过量的ROS则会引起氧化应激<sup>[31]</sup>,因此,胁迫后期其所承受的氧化损伤远远大于BD组植株,而植物自身为了保持良好的生存状态,激活了酶促防御系统,从而导致胁迫后期对照组酶活性高于BD组。但曹语等<sup>[32]</sup>发现,短期高温可诱导抗氧化酶活性的提高,长期高温下细胞膜受损,酶变性失活,最终导致酶活性降低,喷施 $\gamma$ -氨基丁酸可使处理中后期茶树(*Camellia sinensis*)叶片抗氧化酶活性提高,这与本研究结果相悖,可能跟试验条件、物种、诱导剂种类等因素有关。

### 3.4 BD对高温胁迫下Penn A4渗透调节物质的影响

可溶性蛋白质具有增强植物耐脱水能力、保护细胞结构、清除活性氧并且延缓衰老的功能<sup>[33]</sup>,脯氨酸积累能防止植物水分散失,提高原生质胶体的稳定性,减轻高温下蒸腾加剧导致的伤害;并能增强蛋白质稳定性,保护膜结构;同时能为胁迫加重环境下植物的生长提供营养物质<sup>[34-35]</sup>,其积累速度和数量同牧

草的叶片水势、萎蔫程度以及气孔开度等有关<sup>[36]</sup>。短期高温下,芝麻(*Sesamum indicum*)通过提高自身蒸腾失水启动降温机制,诱导了气孔开放;长期胁迫下,为了减少自身水分大量蒸发,保持细胞内部膨压,诱导了气孔关闭<sup>[37]</sup>,褪黑素的施用提高了菊花(*Chrysanthemum morifolium*)气孔导度并促进了渗透物质的合成,降低了有毒物质的累积<sup>[38]</sup>。本研究中,热胁迫前期对照组 Pro、SP 较常温组无明显差异,经 BD 处理后 Pro、SP 明显升高( $\leq 14$  d),胁迫后期 Pro、SP 均显著累积,对照组含量高于 BD 组,可见短期高温抑制了 Pro 合成,BD 打破了这种抑制,促进了胁迫前期 Pro、SP 的累积,以提高因气孔开放降低的叶片水势,维持细胞膨压和膜稳定性;脯氨酸具有高度的吸湿性,可抵制氧化和水解产生的有毒物质<sup>[34]</sup>,胁迫后期膜透性增强,MDA 等有毒物质大量累积,对照植株受热应激影响 Pro、SP 累积以清除 MDA 及活性氧,减轻植物热损伤并为其应对长期胁迫提供能量,BD 组植株所遭受的损伤较小,所以 Pro、SP 低于对照,这也反映出 BD 诱导具有时间效应,而水杨酸对高温下皖贝母(*Fritillaria anhuiensis*)渗透物质累积的促进作用同样具有时效性<sup>[39]</sup>。

## 4 结论

高温胁迫下,叶面喷施 300  $\mu\text{mol/L}$  的 BD 可减缓光合色素降解速度,抑制叶片电解质外渗,降低 MDA、 $\text{H}_2\text{O}_2$  含量,提高胁迫前期( $\leq 14$  d)抗氧化酶(SOD、POD、APX、GR)活性和渗透调节物质(Pro、SP)含量,维持膜结构的稳定性和活性氧的代谢平衡,增强 Penn A4 幼苗耐热性。从而缓解了高温造成的氧化损伤,提高了匍匐剪股颖耐热性。

### 参考文献:

- [1] 王日明,熊兴耀. 高温胁迫对黑麦草生长及生理代谢的影响[J]. 草业学报,2016,25(8): 81-90.
- [2] 刘卓成,韩烈保. 基于 ArcGIS 的中国草坪生态气候区划研究[J]. 草业科学,2018,35(5): 1030-1039.
- [3] 杨勇,胡龙兴,刘志武,等. 过渡带气候区高尔夫球场草种的适应性及综合质量评价[J]. 草地学报,2016,24(2): 393-399.
- [4] 王振. 基于人工干预的高纬度红树秋茄幼苗耐寒性能研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2020.
- [5] 刘梦垚. 两种草坪草高温应答机理及 *F-box* 基因功能解析[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
- [6] 李尝君,彭华,谢运河,等. 基于不同用途的南方果园生草栽培及管理利用技术[J]. 湖南农业科学,2019(3): 63-67,72.
- [7] 周蓉. 不同外源物诱导下剪股颖对  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫的生理响应[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.
- [8] 李灵章. 干旱胁迫下丁二醇诱导对匍匐剪股颖幼苗生理生化指标的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(3): 57-62.
- [9] 宋娅丽,王克勤,王莎,等. 3种冷季型草坪草对持续干旱、高温及其互作的生理生态响应[J]. 草地学报,2018,26(3): 705-717.
- [10] 李灵章. 干旱胁迫下丁二醇诱导对匍匐剪股颖幼苗生理生化指标的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(3): 57-62.
- [11] 史毅. 丁二醇诱导匍匐剪股颖抗病、耐热性及其分子应答研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.
- [12] 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.
- [13] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines[J]. Plant Science,2000,151(1): 59-66.
- [14] 陈建勋. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002:66-72.
- [15] 吴久赞,廉苇佳,曾晓燕,等. 不同品种葡萄对高温的生理响应及耐热性评价[J]. 西北植物学报,2019,39(6): 1075-1084.
- [16] 张路,张启翔. 高温胁迫对灰岩皱叶报春生理指标的影响[J]. 西南农业学报,2011,24(5): 1728-1732.
- [17] 杨娅倩. 外源亚精胺对高温胁迫下葡萄幼苗生理生化特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
- [18] 徐莉莉. 夏季叶面施用磷酸二氢钾和蔗糖对红叶桃和紫叶李叶片色素变化及光合特性的影响[D]. 南京:南京农业大学,2010.
- [19] 申惠翡,赵冰,徐静静,等. 外源水杨酸对西洋杜鹃耐热性的影响[J]. 东北林业大学学报,2016,44(7): 40-45+50.
- [20] 周珩. 外源亚精胺缓解高温胁迫下黄瓜幼苗叶绿素代谢的作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
- [21] 徐莉莉,姜卫兵,韩健,等. 初夏叶面喷施  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  和蔗糖对红叶桃叶片色素变化及净光合速率的影响[J]. 林业科学,2011,47(3): 170-174.

- [22] Chaitanya K V, Sundar D, Masilamani S, *et al*. Variation in heat stress-induced antioxidant enzyme activities among three mulberry cultivars[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 36(2): 175–180.
- [23] Shi Q H, Bao Z Y, Zhu Z J, *et al*. Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumis sativa* L [J]. *Plant Growth Regulation*, 2006, 48(2): 127–135.
- [24] 吴雪霞, 王勇, 姜俊, 等. 外源 NO 对高温胁迫下茄子幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(13): 4456–4465.
- [25] 夏倩倩, 甘立军.  $\gamma$ -氨基丁酸对高温胁迫下高羊茅耐热性的调控[J]. *生物学杂志*, 2018, 35(6): 50–54.
- [26] 孙晓梵, 张一龙, 李培英, 等. 茉莉酸甲酯浸种对狗牙根种子萌发期抗旱性影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(4): 53–60.
- [27] 唐嘉, 毛培胜, 毛春力, 等. 不同活力水平老芒麦种胚线粒体的抗氧化生理变化[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(5): 1–7.
- [28] 屠小菊, 汪启明, 饶力群. 高温胁迫对植物生理生化的影响[J]. *湖南农业科学*, 2013(13): 28–30.
- [29] Santos C V. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves[J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 103(1): 93–99.
- [30] 樊婕, 张雪莹, 孙宪芝, 等. 茉莉酸甲酯对菊花抗蚜性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4197–4205.
- [31] 林少华, 张晓军, 张慧杰, 等. 果蔬氧化还原防御系统研究进展[J]. *中国果菜*, 2021, 41(4): 33–39.
- [32] 曹语, 任太钰, 马媛春, 等. 喷施外源 GABA 对高温条件下茶树叶片部分生理指标的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(5): 69–71.
- [33] 邹原东, 韩振芹, 陈秀新, 等. 干旱胁迫对蓝羊草渗透调节物质和抗氧化酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2013(23): 71–75.
- [34] 杨丹, 田新会, 杜文华. 红三叶新品系的抗旱性研究[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(5): 108–115.
- [35] 张显强, 罗在柒, 唐金刚, 等. 高温和干旱胁迫对鳞叶藓游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. *广西植物*, 2004(6): 570–573.
- [36] 努尤甫提·拉提非克, 胡金娇, 汪辉. 牧草抗旱性研究进展[J]. *草学*, 2021(5): 1–10.
- [37] 苏小雨, 高桐梅, 李丰, 等. 不同耐热基因型芝麻苗期对高温胁迫的生理响应机制[J]. *华北农学报*, 2021, 36(6): 96–105.
- [38] 齐晓媛, 王文莉, 胡少卿, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下菊花光合和生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2496–2504.
- [39] 李同根, 王康才, 罗春红, 等. 水杨酸对高温胁迫下皖贝母生理生化特性的影响及其时效性研究[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(6): 1179–1184.

## Preliminary study on improving heat resistance of creeping bentgrass by exogenous 2, 3-butaneglycol

ZHAO Ning<sup>1</sup>, SHI Yi<sup>2</sup>, MA Hui-ling<sup>1</sup>

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grassland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Agricultural University College of Forestry, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*) could not survive the summer safely in the north transition zone, this experiment simulated the heat stress of artificial climate (37 °C/

32 °C, day/night). By spraying 300 $\mu$  mol/L 2, 3-butanediol (BD), the changes of leaf photosynthetic pigment, cell membrane damage degree, antioxidant enzyme activity and osmotic regulation substance content in Penn A4 seedlings of creeping bentgrass at 0, 7, 14, 21 and 28 days under heat stress were determined and analyzed. The effect of exogenous BD on heat resistance of Penn A4 was studied in this way. The results showed that under normal temperature environment, physiological indexes of Penn A4 treated with BD showed no significant difference compared with the control group ( $P>0.05$ ). The results also implied under high temperature stress, BD treatment significantly slowed down the degradation rate of photosynthetic pigments in Penn A4 leaves ( $P<0.05$ ), effectively inhibited leaf electrolyte exosmotic, and reduced the contents of malondialdehyde and hydrogen peroxide with the extension of stress time. Compared with the high temperature control, exogenous BD increased the activities of superoxide dismutase, peroxidase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase of Penn A4 plants under heat stress ( $\leq 14$  d), and promoted the accumulation of free proline and soluble protein content. In short, foliar spraying of BD could increase the antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substance content of Penn A4 plants in the early stage of stress, maintain the stability of cell membrane and the metabolic balance of reactive oxygen species, thereby alleviating the oxidative damage caused by high temperature and improving the plant heat resistance.

**Key words:** 2, 3-Butanediol; high temperature stress; creeping bentgrass; antioxidant system; cell membrane system; heat resistance