

DOI:10.11686/cyxb2024192

http://cyxb.magtech.com.cn

林心怡, 王旒, 陈拓, 等. 3种植物生长调节剂对结缕草耐荫性的影响. 草业学报, 2025, 34(3): 224—232.

LIN Xin-yi, WANG Ni, CHEN Tuo, *et al.* Effects of three plant growth regulators on shade tolerance of *Zoysia japonica*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 224—232.

3种植物生长调节剂对结缕草耐荫性的影响

林心怡¹, 王旒¹, 陈拓², 宋一岚³, 陆耀东³, 董朝霞^{1*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 华南农业大学农学院, 广东广州 510642; 3. 广东碧然美景观艺术有限公司, 广东佛山 528200)

摘要:光照是草坪草进行光合作用的重要能源,是植物进行生长和养分合成的基础。然而,在城市中高楼大厦等建筑物的遮挡往往会对草坪造成影响,限制正常的生长发育。为优化遮荫环境下的草坪养护与管理,以“广绿”结缕草(‘Guanglv’)为试验材料,在人工遮荫条件(遮荫率80%)下,叶面喷施混合除草剂茚嗪氟草胺(50 mL·hm⁻²)+三氟啶磺隆(22.5 mL·hm⁻²)、多效唑(PBZ, 120 mL·hm⁻²)和抗倒酯(TE, 50 mL·hm⁻²),探讨其对“广绿”结缕草的外部形态和生理特性的影响,包括平均日生长速度、叶片宽度、叶片绿色程度、盖度、抗氧化酶活性和丙二醛含量。结果表明:“广绿”结缕草在长期遮荫条件下会出现徒长、叶片形态趋向于狭长、叶绿素相对含量下降、盖度大幅下降、丙二醛含量增加、抗氧化酶活性下降的态势。3种生长调节剂中,以喷施50 mL·hm⁻²茚嗪氟草胺+22.5 mL·hm⁻²三氟啶磺隆和50 mL·hm⁻²抗倒酯的效果较好,不仅可以改善弱光条件下结缕草的不良形态,还有效增强了草皮的环境适应性与抗逆性。

关键词:结缕草;植物生长调节剂;耐荫性

Effects of three plant growth regulators on shade tolerance of *Zoysia japonica*

LIN Xin-yi¹, WANG Ni¹, CHEN Tuo², SONG Yi-lan³, LU Yao-dong³, DONG Zhao-xia^{1*}

1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Biranmei Landscape Art Co., Ltd., Foshan 528200, China

Abstract: Light serves as the essential energy source, underpinning the processes of photosynthesis, growth, and nutrient assimilation within plant systems. However, urban green spaces frequently present challenges such as overshadowing of lawn areas by towering structures, which can seriously impede the lawn's capacity for normal growth and development. This research studied the maintenance and management of a *Zoysia japonica* cv. ‘Guanglv’ lawn under shaded conditions. Foliar sprays of the mixed herbicide indaziflam (50 mL·ha⁻¹) + trifloxysulfuron (22.5 mL·ha⁻¹), paclobutrazol at 120 mL·ha⁻¹ and trinexapac-ethyl at 50 mL·ha⁻¹ were conducted under artificial shading (80% shade). This study comprehensively evaluated the effects of three plant growth regulators on the external morphology and physiological characteristics of ‘Guanglv’ zoysiagrass. Traits measured included daily growth rate, leaf width, leaf green color intensity, percent green cover, superoxide dismutase activity, peroxidase activity, and malondialdehyde content. It was found that under continuous shading, ‘Guanglv’ zoysiagrass displayed a range of stress symptoms, including etiolation, narrowing and lengthening of

收稿日期:2024-05-21;改回日期:2024-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(31672039)和广东省企业科技特派员专项(GDKTP2021049200)资助。

作者简介:林心怡(2000—),女,江苏宜兴人,在读硕士。E-mail: 489667739@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: dongzhaoxia@scau.edu.cn

leaves, a reduction in relative chlorophyll content, a marked decrease in turf ground cover, elevated levels of malondialdehyde, and diminished activity of antioxidant enzymes. Among the growth regulators tested, the combination of 50 mL·ha⁻¹ indaziflam+22.5 mL·ha⁻¹ trifloxysulfuron and 50 mL·ha⁻¹ trinexapac-ethyl proved the most effective. These treatments not only ameliorated the adverse stress symptoms in zoysiagrass under shaded conditions, but also increased antioxidant enzyme activity, effectively enhancing the environmental adaptability, stress resistance, and shade tolerance.

Key words: zoysiagrass; plant growth regulator; shade tolerance

随着城市化水平和民众生活水平的显著提升,人们对居住环境品质的追求日益增长。据统计,截至2020年,我国人均公园绿地面积已增至14.87 m²,标志着绿色生活空间的大幅扩展。展望未来,持续扩大城市绿地规模依然是城市绿化发展的核心导向。在这一进程中,草坪作为城市绿地生态系统的关键组成部分^[1],发挥着美化环境、净化空气、保持水土等多重生态与社会效益,其重要性不容忽视。因此,通过科学建植与维护草坪,成了提升城市绿化品质、构建宜居城市环境的必由之路。

然而,伴随城市化进程的加速,摩天大楼的密集耸立成为常态,这不可避免地引发了城市空间中光照资源的稀缺,给草坪的正常生长带来了严峻挑战。光照是草坪草进行光合作用的重要能源,是植物进行生长和养分合成的基础^[2],长期的遮荫会导致草坪草生长受限,表现为植株矮小稀疏、叶片薄而长,颜色失绿且缺乏光泽,光合作用的减弱会使得碳水化合物积累减少^[3],植株自然防御机制被削弱,易染病虫害。整体草坪覆盖度降低、结构脆弱和更新能力减弱^[4],美观度大打折扣。强化草坪草种的耐荫性能已成为草坪草育种及日常养护管理中的核心课题之一,草坪草育种存在选育周期长、再生体系不成熟等困难^[5],而利用植物生长调节剂(plant growth regulators, PGRs)对草坪进行外源喷施可起到直接调控的作用^[6],且方法简单、见效快。因此,开展在遮荫条件下对草坪喷施生长调节剂的研究有助于进一步探究草坪草的耐荫机理。

“广绿”结缕草(*Zoysia japonica* cv. ‘Guanglv’)因其叶色鲜艳、青绿期长、耐践踏、耐高温等特性在华南地区被广泛应用于公园绿地和高尔夫球场,然而,在遮荫条件下会出现密度降低、品质下降的现象。因此,本研究拟通过叶面喷施混合除草剂茚啉氟草胺+三氟啶磺隆(indaziflam+trifloxysulfuron, JW)、多效唑(paclobutrazol, PBZ)和抗倒酯(trinexapac-ethyl, TE)来筛选出效果最佳的生长调节剂,以期为遮荫环境下的结缕草草坪养护与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验“广绿”结缕草草皮取自华南农业大学宁西教学科研基地(23°16' N, 113°35' E),该基地属亚热带季风气候,年平均气温为21.7~23.1℃,年平均降水量和日照时数分别为1967.8 mm和1820~1960 h。

1.2 试验设计与处理

本试验在华南农业大学草业科学系教学基地大棚内采用盆栽试验进行。将泥炭土和沙子按1:1的比例混合均匀装入塑料盆中(长16 cm,宽16 cm,高18 cm),选取长势良好的结缕草草皮及时移栽,移栽后保证水分充足供应,修剪高度保持5 cm,待结缕草成坪后进行喷药处理。

本试验以自然生长不喷施生长调节剂的盆栽作为对照组CK, T₁处理喷施混合除草剂茚啉氟草胺(500 g·L⁻¹悬浮剂,德国拜耳作物科学公司)+三氟啶磺隆(11%可分散油悬浮剂,瑞士先正达作物保护有限公司),试验期间只喷施一次; T₂处理喷施多效唑(15%可湿性粉剂,四川国光农化股份有限公司),每3周喷施一次; T₃处理喷施抗倒酯(25%微乳剂,北京拜奥威环保科技有限公司),每3周喷施一次,每个处理设置4次重复。生长调节剂的有效成分用量参考了相关文献^[7-8]的推荐用量,并结合前期的预备试验结果进行了调整,具体的剂量见表1。于2023年9月上旬的晴天上午,采用气压式喷壶(苍强气压式喷壶,浙江)喷施药剂,施药24 h内不做浇水处理,24 h后将盆栽放入遮荫率为80%的黑色遮阳大棚中。

1.3 指标测定及试验方法

平均日生长速度:采用5点取样法,将称量纸置于草坪冠层,用直尺测定纸平面到地面的垂直高度,每2周测量一次。平均日生长速度的公式为:

$$\text{平均日生长速度} = \frac{\text{两次测量之间的株高增加量}}{\text{测量间隔天数}}$$

叶片宽度:用电子数显卡尺(广陆金属壳数显卡尺,广西)测量叶片最宽处,每周测量一次。

盖度:用自制16 cm×16 cm共计100格的方形网格测定盆栽内的草坪草所占点数,并记录数据,每周测量一次。

叶片绿色程度:采用便携式叶绿素测定仪SPAD-502 Chlorophyll Meter (SPAD-502Plus, 日本)测量叶尖部、叶中部、叶基部的相对叶绿素含量(SPAD值)。

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性:采用氮蓝四唑(nitro blue tetrazolium chloride, NBT)光还原法测定^[9]。

过氧化物酶(peroxidase, POD)活性:采用愈创木酚法测定^[10]。

丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量:采用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)检验法测定^[11]。

1.4 数据处理

采用EXCEL 2018记录所得数据,采用SPSS软件进行方差分析,用LSD法进行多重比较后用Origin 2022作图。

2 结果与分析

2.1 3种生长调节剂对遮荫条件下结缕草外部形态的影响

2.1.1 对结缕草生长速度的影响 从表2的数据来看,遮荫前期(0~15 d)CK的平均日生长速度最快, T₁处理次之, T₂和 T₃处理生长速度较慢。遮荫中期(16~30 d)CK的生长速度最快, T₂、T₁处理次之, T₃处理生长速度最慢。遮荫后期(31~50 d)所有处理均无显著差异。

2.1.2 对结缕草叶宽的影响 从图1可以看出 T₁、T₃处理的叶宽基本呈先上升后下降再上升的趋势, T₂处理则是先上升后下降的趋势,而CK处理则显示出持续下降的趋势。喷施7周后,对照组叶宽较7周前下降了12%, T₂处理下降了18%, T₃处理下降了17%,表明结缕草经过一段时间的遮荫后会出现叶片变窄的现象。从第7周的数据来看, T₁和 T₃处理的结缕草叶片依次比CK宽22%和2%, T₁处理与CK存在显著性差异(P<0.05), T₂处理的结缕草叶片比CK窄2%,表明混合除草剂JW和抗倒酯均可改善遮荫环境下结缕草叶片变窄的现象。

2.1.3 对结缕草叶片绿色程度的影响 图2为遮荫7周后结缕草叶片中叶绿素含量的相对值(SPAD值),从低到高依次为: T₁>T₃>T₂>CK,施用生长调节剂的处理均高于对照处理,表明3种生长调节剂均能提高遮荫环境下结缕草的叶绿素相对含量。T₁、T₂、T₃处理的SPAD值依次比CK高出14%、3%、11%,其中, T₁和 T₃处理与CK有显著差异(P<0.05)。

2.1.4 对结缕草盖度的影响 从图3A可以看出,所有处理的盖度都呈下降趋势,第6周时下降明显,表明遮荫时间越长,草坪盖度越低。遮荫第7周,CK与 T₁和 T₃处理相比均差异显著(P<0.05),CK比 T₁、T₂和 T₃处理

表1 试验设计与处理

Table 1 Experimental design and treatment (mL·hm⁻²)

处理编号 Number	生长调节剂 Plant growth regulators	有效成分用量 Active ingredient dosage
CK	\\	\\
T ₁	苄噻氟草胺+三氟啶磺隆 Indaziflam+trifloxysulfuron	50.0+22.5
T ₂	多效唑 Paclobutrazol	120
T ₃	抗倒酯 Trinexapac-ethyl	50

表2 3种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草平均日生长速度的影响

Table 2 Effects of three plant growth regulators on the average daily growth rate of *Z. japonica* under shading conditions (mm·d⁻¹)

处理 Treatments	0~15 d	16~30 d	31~50 d
CK	0.53±0.03a	0.21±0.05a	0.09±0.02a
T ₁	0.45±0.02ab	0.13±0.02ab	0.11±0.02a
T ₂	0.40±0.04b	0.19±0.03ab	0.10±0.02a
T ₃	0.43±0.03b	0.11±0.01b	0.10±0.02a

注:同列不同字母代表差异性显著(P<0.05)。

Note: Different letters in the same column represent significant differences (P<0.05).

的结缕草草坪盖度依次低 38%、9%、30%。由图 3B 的线性关系可知 T₁和 T₃处理下的草坪盖度下降相对缓慢。

2.2 3 种生长调节剂对遮荫条件下结缕草生理特性的影响

2.2.1 对结缕草膜脂过氧化程度的影响

由图 4 可知,除 T₃处理的 MDA 含量呈逐渐上升趋势,其他处理均呈先下降后上升的趋势。遮荫的前两周各处理的 MDA 含量变化幅度不大,遮荫 28~56 d,除 T₁处理外,其他各处理的 MDA 含量大幅上升。第 56 天时,各处理 MDA 含量从大到小依次是 CK>T₃>T₂>T₁,CK 与 T₃处理无显著差异,表明这两个处理细胞膜脂过氧化较严重,T₁、T₂和 T₃处理的结缕草 MDA 含量比 CK 依次低 29%、14%、4%,T₁处理的 MDA 含量最低,表明其缓解膜脂过氧化程度的效果最好。

2.2.2 对结缕草抗氧化酶活性的影响

由图 5 可知,SOD 和 POD 活性几乎都呈先上升后下降的趋势,峰值出现在 14~28 d。图 5A 中,T₃处理的 SOD 活性在 7 d 达到峰值,T₁、T₂处理在 14 d 达到峰值,CK 处理在 28 d 达到峰值。56 d 时 CK、T₁和 T₃处理的 SOD 活性较遮荫初期(0~7 d)依次降低 32%、7%、23%,T₂处理的 SOD 活性增加了 34%,可见遮荫前期各处理的 SOD 活性较高,随着遮荫时间变长,光照不足,各处理的 SOD 活性缓慢下降,其中 T₂处理能使结缕草体内维持较高的 SOD 活性水平。CK、T₂和 T₃处理的 POD 活性在 14 d 达到峰值且波动范围大,T₁处理在 28 d 达到峰值且整个遮荫过程变化幅度不大(图 5B)。遮荫末期(49~56 d)各处理的 POD 活性较遮荫初期依次降低 17%、8%、18% 和 12%,表明长期遮荫会降低结缕草体内的 POD 活性。56 d 时各处理的 POD 活性从大到小依次是 T₂>T₁>T₃>CK,T₁和 T₂处理无显著差异,且 T₁处理较遮荫初期的 POD 活性降幅不大,表明 T₁处理对于维持结缕草体内的 POD 活性效果较好。

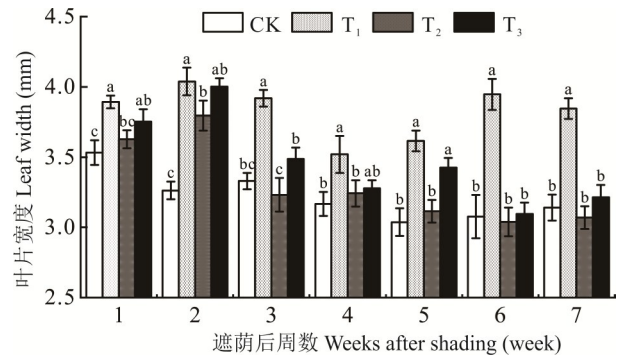


图 1 3 种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草叶宽的影响
Fig. 1 Effect of three plant growth regulators on leaf width of *Z. japonica* under shading condition

不同字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

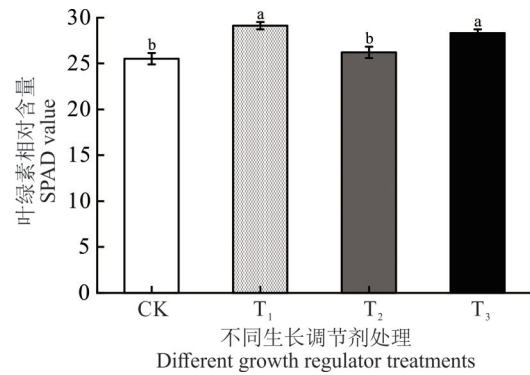


图 2 3 种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草叶片绿色程度的影响
Fig. 2 Effect of three plant growth regulators on the green degree of *Z. japonica* leaves under shading condition

不同字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

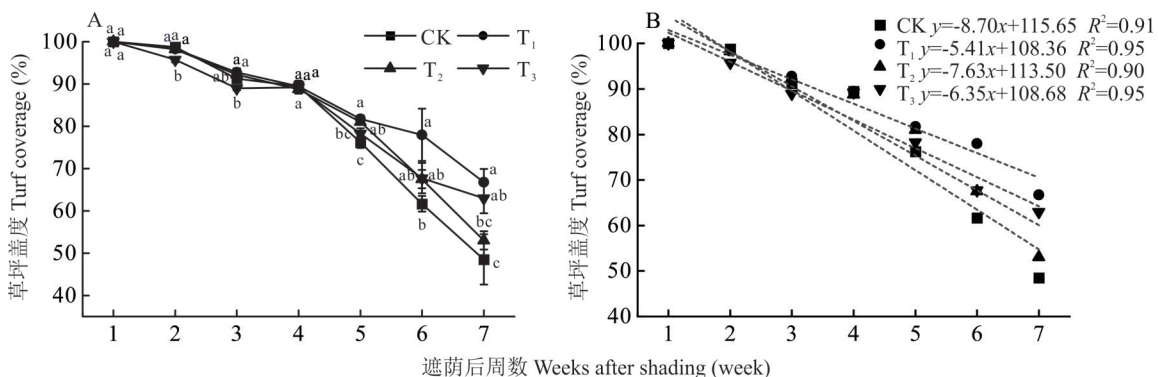


图 3 3 种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草盖度的影响

Fig. 3 Effect of three plant growth regulators on the coverage of *Z. japonica* under shading condition

3 讨论

3.1 3种生长调节剂对遮荫条件下结缕草外部形态的影响

在面临遮荫胁迫时,植物会通过增强植株向上的生长态势,或者使叶片形态趋向于狭长,以最大化地捕捉和利用有限的光照资源,从而优化光合作用的进行^[12],且在狗牙根(*Cynodon dactylon*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、钝叶草(*Stenotaphrum helferi*)等常见草坪草中已经观察并确认了这一适应性变化^[13-16]。本试验所得结果与上述研究所揭示的现象表现出一致性,广绿结缕草在长期的遮荫环境中会出现徒长、叶片变窄的情况。

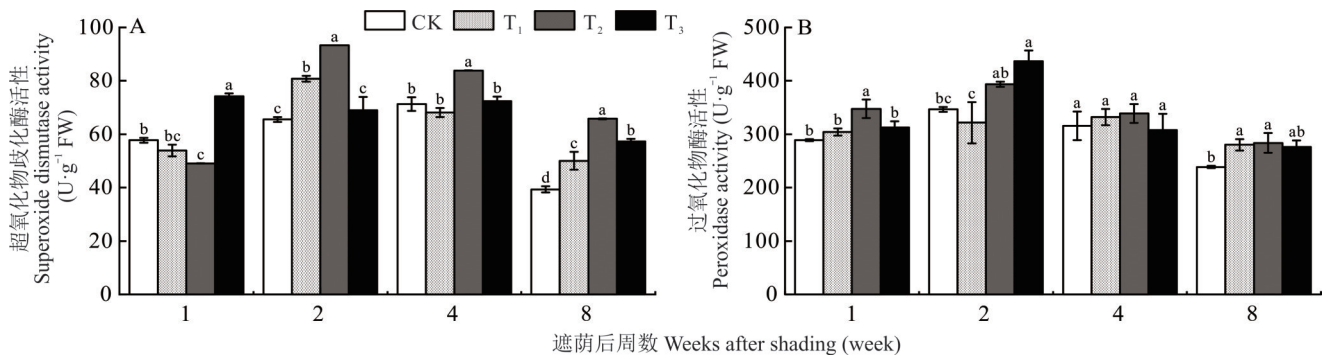


图5 3种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的影响

Fig. 5 Effects of three plant growth regulators on superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activity of *Z. japonica* under shading condition

抗倒酯(trinexapac-ethyl)作为一种赤霉素合成抑制剂,可以起到抑制节间伸长、降低株高、增加茎秆粗度和茎壁厚度、促进根系发达等作用^[17]。先前的研究工作已经广泛探讨了在遮荫环境中对草坪草施用TE以维持草坪质量的技术,如罗建章等^[18]发现在“兰引三号”结缕草草坪上喷施抗倒酯可以显著降低不同遮荫率下的冠层高度、叶长和赤霉素含量,并提高草坪绿色指数和草坪质量。胡瑜等^[12]发现遮荫环境下,对狗牙根草坪外源施用抗倒酯,其冠层高度、叶长、叶宽、根茎节间长和草坪绿色指数在第30天时均显著降低。本研究中,对广绿结缕草施用抗倒酯,可在遮荫0~30 d时抑制其生长速度,增加叶宽和叶绿素相对含量。遮荫后期,喷施抗倒酯的盆栽盖度显著高于对照组,表明施用TE在逆境条件下表现出积极作用;赤霉素在植物体内通常促进顶端生长,抑制侧芽发展^[19-21],而抗倒酯通过抑制赤霉素的合成,可能会减轻顶端优势,为侧芽的生长提供更多机会,从而增强其群体繁茂度和地面覆盖能力,有效缓解了遮荫胁迫,这与上述研究结果相一致。

多效唑(paclobutrazol)是一种三唑类生长延缓剂,多效唑被广泛应用于矮化草坪,减少草坪的修剪次数。外源施用多效唑可以缩短草坪草的节间、抑制生长速度,促进分蘖、提高草坪成坪速度^[22-24],优化生理代谢、提高抗逆性^[25]。本研究中,在遮荫0~30 d时,PBZ可显著降低结缕草的生长速度,这与Ryu等^[26]的研究结果一致。但在长期的遮荫环境下,施用PBZ对结缕草的叶宽、绿色程度和盖度无显著影响,表明PBZ不适合在长期遮荫时施用。

茚嗪氟草胺(indaziflam)是一种纤维素生物合成抑制(celulose biosynthesis inhibiting, CBI)除草剂,其作用机理在于干预植物细胞膜的合成进程,以此阻碍植物分生组织的正常发育,可为多种一年生禾本科杂草和阔叶杂草

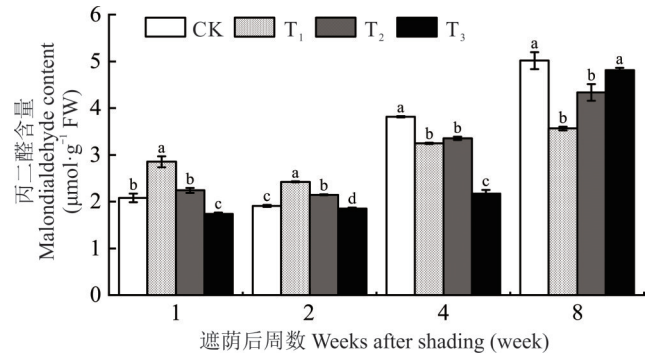


图4 3种植物生长调节剂对遮荫条件下结缕草丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effects of three plant growth regulators on malondialdehyde (MDA) content of *Z. japonica* under shading condition

提供广谱芽前控制^[27-28]。三氟啶磺隆(trifloxysulfuron)是一种新型的磺酰脲类除草剂^[29],主要用于防除阔叶杂草和莎草科杂草。除草剂配方中的一些成分与生长调节剂有着相似的功能属性,当以合适的浓度施用于草坪时,它们能够作为生长抑制剂有效延缓植物的生长发育^[30]。国外已有多位学者广泛开展了关于将除草剂应用于草坪作为生长调节手段的研究,如Dias等^[31]评估了草甘膦作为生长调节剂对百喜草(*Paspalum notatum*)和阔叶地毯草(*Axonopus compressus*)的效果,发现当草甘膦在百喜草上施用量为5.625~22.500 g a. i. ·hm⁻²和在阔叶地毯草上施用量不高于90 g a. i. ·hm⁻²时可以抑制植物生长,但不影响植物视觉质量、绿色覆盖指数和干生物量。目前未见苊嗉氟草胺和三氟啶磺隆运用于矮化草坪、提高草坪质量的报道。本研究中,与对照相比,施用混合除草剂JW能够缓解遮荫环境下结缕草徒长的状况,这可能是由于苊嗉氟草胺可以抑制结晶纤维素在植物细胞壁的沉积,从而干扰细胞壁的形成、细胞分裂以及细胞伸长^[32-33],同时,三氟啶磺隆可以抑制乙酰乳酸合成酶(acetolactate synthase, ALS)的活性,该酶参与支链氨基酸的合成,间接影响了草坪草的生长速率^[34]。此外,本研究发现施用JW还可以有效改善光照不足引起的叶片变窄、叶绿素相对含量下降的情况,使结缕草维持较好的坪用价值。

3.2 3种生长调节剂对遮荫条件下结缕草生理特性的影响

活性氧(reactive oxygen species, ROS)作为有氧代谢副产物或胁迫反应中的信号成分在植物中不断产生^[35]。在生物胁迫(如病原菌侵染)和非生物胁迫(如干旱、盐碱、低温、高温、重金属污染等)条件下,植物细胞内ROS的产生会显著增加,通过激活特定的防御途径来增强植物的抗逆性^[36]。而当ROS的产生超过清除能力时,过度积累会导致氧化应激,损伤细胞结构和功能,比如破坏生物膜的完整性、抑制光合作用、干扰激素平衡以及诱导DNA损伤等^[37]。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化过程中产生的末端产物,在植物体内主要作为评价氧化应激的指标,它的含量可以用来衡量植物细胞膜脂过氧化的程度。当植物遭遇各种逆境,如高温、低温、干旱、盐碱、病虫害等时,会产生大量的活性氧自由基(ROS)。这些自由基攻击细胞膜中的多不饱和脂肪酸,引发链式脂质过氧化反应,最终生成MDA。MDA含量的升高标志着植物遭受氧化胁迫的严重程度。本研究发现,对照处理和喷施混合除草剂JW、多效唑处理后的结缕草体内MDA含量呈先下降后上升的趋势,喷施抗倒酯的处理呈不断上升的趋势。CK处理和喷施PBZ的处理在遮荫7~14 d时MDA含量较低,28 d后开始大幅上涨,56 d时的MDA含量比初期分别增加141%和94%,喷施TE的处理在遮荫7~28 d时MDA含量较低,遮荫后期涨幅较大,56 d时的MDA含量比初期增加了177%,表明随着遮荫时间的延长,结缕草因光照不足而导致的膜脂过氧化越来越严重,细胞膜结构和功能受到一定的损伤,这与前人在假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)上的研究结果一致^[38]。与其他处理相比,喷施混合除草剂JW的处理在遮荫后7~14 d结缕草体内MDA含量较高,但在遮荫后期变化幅度不大,56 d时的MDA含量比初期仅增加25%,说明喷施混合除草剂JW可以有效抑制遮荫条件下结缕草体内MDA含量的升高,使其保持在稳定的范围,避免细胞膜结构受到严重损伤。

超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)都是植物体内清除系统中对活性氧起直接作用的清除剂。SOD和POD在抗氧化系统中协同发挥关键作用。SOD首先催化超氧阴离子转化为过氧化氢和氧气,降低细胞内的氧化压力;随后,POD继续催化过氧化氢降解为水和氧气,彻底解除其毒性。两者共同构成了植物体内清除活性氧的核心防线,通过此协同作用,维持细胞氧化还原平衡,保护植物免受氧化胁迫损伤,增强对逆境和病害的抵抗能力,保障植物正常生长发育^[39]。本研究中各处理均在遮荫中期SOD和POD活性较高,遮荫后期SOD和POD的活性逐渐下降,表明光照的减弱可以激发植物体内抗氧化酶的产生,但是当环境胁迫持续时间过长或强度加剧至超过细胞耐受极限时,细胞内氧化应激状态恶化会对其正常功能产生消极影响^[40],这种状态不仅会使得细胞膜脂过氧化过程加剧,还会进一步影响细胞内部蛋白质等生物分子的合成效能^[41-42]。因此,在长期的遮荫环境中,结缕草细胞内抗氧化酶活性可能出现下降趋势,这与杜春辉^[43]的研究结果相似。56 d时各施药处理的SOD、POD活性均高于对照处理,表明喷施这3种生长调节剂均有助于提高遮荫环境下结缕草体内的抗氧化酶活性。其中,喷施PBZ的处理在遮荫中后期SOD和POD活性均较高,原因可能是施用PBZ后产生了对抗氧化酶的应激保护^[44],这也表明PBZ可以有效缓解弱光胁迫,使遮荫条件下的结缕草维持较好的抗氧化能力。

4 结论

“广绿”结缕草在长期遮荫条件下,喷施 $50\text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 苊嗪氟草胺+ $22.5\text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 三氟啶磺隆和 $50\text{ mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 抗倒酯的效果较好,不仅可以抑制因光照不足引发的结缕草不良形态特征,还有效促进了低光条件下的草坪质量优化,显著增强了草皮的环境适应力与抗逆性。

参考文献 References:

- [1] Wang Y P, Fan B, Zhang H K, *et al.* Responses of *Zoysia matrella* growth, soil mineral nitrogen, and nitrogen balance to different levels of irrigation and mowing. *Pratacultural Science*, 2023, 40(11): 2787–2799.
王云鹏, 范博, 张海阔, 等. 灌溉和修剪对沟叶结缕草生长、土壤无机氮及氮平衡的影响. *草业科学*, 2023, 40(11): 2787–2799.
- [2] Yang M, Mao K. The impact of shading on turfgrass. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 60–63.
杨渺, 毛凯. 遮荫对草坪草的影响. *草业科学*, 2002, 19(1): 60–63.
- [3] Singh B, Sindhu S S, Arora A, *et al.* Growth and physiological potential of various turf grass species under graded shade levels. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 91(8): 1140–1145.
- [4] Dudeck A E, Peacock C H. Shade and turfgrass culture//Waddington D V, Carrow R N, Shearman R C. *Turfgrass*. Madison (WI), USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1992, 32: 269–284.
- [5] Ma C Z, Cui H T, Hu Q N, *et al.* Research progress on regeneration system of turfgrass. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8): 2241–2252.
马承泽, 崔会婷, 胡倩楠, 等. 草坪草再生体系研究进展. *草地学报*, 2023, 31(8): 2241–2252.
- [6] Rademacher W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34(4): 845–872.
- [7] Zhao Q J, Yang W H, Wang G H. The impact of paclobutrazol on the growth of seashore paspalum. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2014, 43(9): 125–127.
赵庆杰, 杨文汉, 王桂花. 多效唑对海滨雀稗草坪草生长的影响. *农业科技通讯*, 2014, 43(9): 125–127.
- [8] Liu B W. The regulation effect of paclobutrazol on low light tolerance in tall fescue. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.
刘博文. 多效唑对高羊茅耐荫性的调控作用. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [9] Beyer W F, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: Some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 1987, 161(2): 559–566.
- [10] Amako K, Chen G, Asada K. Separate assays specific for ascorbate peroxidase and guaiacol peroxidase and for the chloroplastic and cytosolic isozymes of ascorbate peroxidase in plants. *Plant and Cell Physiology*, 1994, 35(3): 497–504.
- [11] Puckette M C, Weng H, Mahalingam R. Physiological and biochemical responses to acute ozone-induced oxidative stress in *Medicago truncatula*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45(1): 70–79.
- [12] Hu Y, Shen Q P, Xu Q, *et al.* Effects of growth regulators isabion and primo on the shade tolerance and turf quality of Bermudagrass. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(8): 69–76.
胡瑜, 申乔萍, 徐倩, 等. 生长调节剂绿比多和浦绿对狗牙根耐荫性和草坪质量的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(8): 69–76.
- [13] Li K H, Li Z D, Wu B Y, *et al.* Effects of light intensity on morphological change and lawn quality of wild *Cynodon dactylon*. *Pratacultural Science*, 2012, 29(5): 699–703.
黎可华, 李志东, 吴碧云, 等. 不同光照强度对几种狗牙根形态与草坪品质的影响. *草业科学*, 2012, 29(5): 699–703.
- [14] Yang Y, Yang X H, Sun Y. Effect on turf characteristics of the Kentucky bluegrass turf under different shading intensities. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(3): 447–451.
杨燕, 杨晓华, 孙彦. 不同遮荫强度对草地早熟禾草坪质量的影响. *草地学报*, 2010, 18(3): 447–451.
- [15] Chen C M, Lin Z L, Wang B B, *et al.* Effect of light intensity on turf performance of 19 tall fescue varieties//Proceedings of the 2013 academic conference of the Chinese Grassland Society. Tianjin: Chinese Grassland Society, 2013: 436–448.
陈传明, 林之林, 王彬彬, 等. 光照强度对19份高羊茅材料坪用性状的影响//中国草学会2013学术年会论文集. 天津: 中国草学会, 2013: 436–448.

- [16] Yang J. Effect of shading on *Stenotaphrum* Trin. plant morphology and physiology. Haikou: Hainan University, 2021.
杨娟. 遮荫对钝叶草属植物形态与生理的影响. 海口: 海南大学, 2021.
- [17] Fagerness M J, Penner D. ¹⁴C-trinexapac-ethyl absorption and translocation in Kentucky bluegrass. *Crop Science*, 1998, 38(4): 1023–1027.
- [18] Luo J Z, Li S M, Xiang Z X, *et al.* Effects of primo on shade tolerance of fairway turfgrass *Zoysia japonica* on golf course. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3): 743–749.
罗建章, 李双铭, 向佐湘, 等. 浦绿对高尔夫球道结缕草草坪耐荫性的影响. *草地学报*, 2020, 28(3): 743–749.
- [19] Castro-Camba R, Sánchez C, Vidal N, *et al.* Plant development and crop yield: The role of gibberellins. *Plants*, 2022, 11(19): 2650.
- [20] Cao D, Chabikwa T, Barbier F, *et al.* Auxin-independent effects of apical dominance induce changes in phytohormones correlated with bud outgrowth. *Plant Physiology*, 2023, 192(2): 1420–1434.
- [21] Zhang Q, Wang J, Wang L, *et al.* Gibberellin repression of axillary bud formation in *Arabidopsis* by modulation of DELLA-SPL9 complex activity. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 62(4): 421–432.
- [22] Gao L, Liu G D. Advances in application of paclobutrazol to lawn grass. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2008, 28(4): 98–102.
高玲, 刘国道. 植物生长调节剂——多效唑在草坪草上的应用进展. *热带农业科学*, 2008, 28(4): 98–102.
- [23] Desta B, Amare G. Paclobutrazol as a plant growth regulator. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2021, 8(1): 1–15.
- [24] Shahzad M M, Akhtar G, Shehzad M A, *et al.* Paclobutrazol and maleic hydrazide-induced growth inhibition in warm season turfgrasses through structural and physiological differences. *Kuwait Journal of Science*, 2023, 50(4): 674–680.
- [25] Zhang S, Yuan W J, Song X M, *et al.* Effects of paclobutrazol on plant physiology and ecology and its application prospect in the field of desertification. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2022, 5(1): 1–6, 11.
张帅, 原伟杰, 宋晓敏, 等. 多效唑对植物生理生态的影响及其在荒漠化领域的应用展望. *温带林业研究*, 2022, 5(1): 1–6, 11.
- [26] Ryu J H, Kim K S. Flurprimidol, paclobutrazol, and trinexapac-ethyl increased lateral development of ‘Zenith’ Zoysiagrass in a shade environment. *Weed & Turfgrass Science*, 2010, 24(2): 149–155.
- [27] Brabham C, Lei L, Gu Y, *et al.* Indaziflam herbicidal action: A potent cellulose biosynthesis inhibitor. *Plant Physiology*, 2014, 166(3): 1177–1185.
- [28] Sebastian D J, Fleming M B, Patterson E L, *et al.* Indaziflam: a new cellulose-biosynthesis-inhibiting herbicide provides longterm control of invasive winter annual grasses. *Pest Management Science*, 2017, 73(10): 2149–2162.
- [29] Brecke B J, Stephenson D O. Weed control in cotton (*Gossypium hirsutum*) with postemergence applications of trifloxysulfuron-sodium. *Weed Technology*, 2006, 20(2): 377–383.
- [30] Deng P C. Effects of plant growth regulators on growth characteristics and turf quality of bermudagrass. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(4): 841–852.
邓丕超. 植物生长调节剂对狗牙根生长特性及坪用质量的影响. *浙江农业学报*, 2023, 35(4): 841–852.
- [31] Dias R C, Dadazio T S, Tropaldi L, *et al.* Glyphosate as growth regulator for bahiagrass and broadleaf carpetgrass. *Planta Daninha*, 2019, 37(1): e019213829.
- [32] Zhang X L, Li Z M. Recent advances in cellulose biosynthesis inhibiting (CBI) herbicides. *World Pesticides*, 2013, 35(2): 10–15.
张秀兰, 李正名. 纤维素生物合成抑制剂(CBI)类除草剂研究进展. *世界农药*, 2013, 35(2): 10–15.
- [33] Larson R T, McFarlane H E. Small but mighty: An update on small molecule plant cellulose biosynthesis inhibitors. *Plant and Cell Physiology*, 2021, 62(12): 1828–1838.
- [34] Nandula V K, Giacomini D A, Ray J D. Resistance to acetolactate synthase inhibitors is due to a W 574 to L amino acid substitution in the *ALS* gene of redroot pigweed and tall waterhemp. *PLoS One*, 2020, 15(6): e0235394.
- [35] Liu Y, He C. Regulation of plant reactive oxygen species (ROS) in stress responses: learning from AtRBOHD. *Plant Cell Reports*, 2016, 35(5): 995–1007.
- [36] Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(5): 1229–1240.
- [37] Heller J, Tudzynski P. Reactive oxygen species in phytopathogenic fungi: Signaling, development, and disease. *Annual*

- Review of Phytopathology, 2011, 49(1): 369–390.
- [38] Liu C X. Physiological response mechanism and expression of shade-related genes in *Eremochloa ophiuroides* under shading stress. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
刘传鑫. 假俭草遮荫胁迫生理响应机制及耐荫相关基因表达研究. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [39] Yin Y Q, Hu J B, Deng M J. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 24(1): 105–110.
尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展. 中国农学通报, 2007, 24(1): 105–110.
- [40] Li X, Yue H, Wang S, *et al.* Research of different effects on activity of plant antioxidant enzymes. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(7): 973–978.
李璇, 岳红, 王升, 等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状. 中国中药杂志, 2013, 38(7): 973–978.
- [41] Lee D H, Lee C B. Chilling stress-induced changes of antioxidant enzymes in the leaves of cucumber: in gel enzyme activity assays. Plant Science, 2000, 159(1): 75–85.
- [42] Ekmekçi Y, Tanyolaç D, Ayhan B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(6): 600–611.
- [43] Du C H. Study on physiological response and shade tolerance of three species of *Aglaonema commutatum* to low light stress. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
杜春辉. 三种粗肋草对弱光胁迫生理响应及耐荫性研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [44] Nagar S, Singh V P, Arora A, *et al.* Understanding the role of gibberellic acid and paclobutrazol in terminal heat stress tolerance in wheat. Frontiers in Plant Science, 2021, 12(2): 692252.