

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.013

引用格式:唐雅楠,韩露,段梦琪,等.乙烯利对草坪草干旱胁迫下脯氨酸等生理指标的影响[J].草地学报,2026,34(9):3284—3291

TANG Ya-nan, HAN Lu, DUAN Meng-qi, et al. Effects of Ethephon on Physiological Indicators such as Proline in Turfgrass under Drought Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3284—3291

乙烯利对草坪草干旱胁迫下脯氨酸等生理指标的影响

唐雅楠, 韩露, 段梦琪, 杜广启, 许立新*, 韩烈保

(北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083)

摘要:适宜浓度的乙烯利可以提升草坪草的耐旱性,但具体作用机制未知。脯氨酸作为渗透调节物质,在植物逆境胁迫响应中发挥重要作用。本文以草地早熟禾(*Poa pratensis*)和多年生黑麦草(*Lolium perenne*)为材料,检测乙烯利对干旱胁迫下草坪草生理指标的影响,并分析脯氨酸合成与降解代谢相关基因表达的变化,探讨脯氨酸在乙烯利提升草坪草抗旱性中的作用。结果表明:乙烯利可缓解干旱胁迫诱导的草坪草叶片相对含水量的下降和电解质渗透率的上升,对耐旱性提升有一定作用。干旱胁迫下草地早熟禾两个品种的脯氨酸含量升高,但多年生黑麦草品种脯氨酸含量变化不一致。乙烯利处理能够下调干旱胁迫下草地早熟禾脯氨酸脱氢酶基因(*Proline Dehydrogenase*, *Pro DH*)的表达,从而抑制脯氨酸降解。综上,通过抑制*Pro DH*基因表达,促进脯氨酸积累可能是乙烯利提高草地早熟禾的耐旱性的机制之一。

关键词:乙烯利;草坪草;脯氨酸;干旱胁迫;基因表达

中图分类号:S688.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3284-08

Effects of Ethephon on Physiological Indicators such as Proline in Turfgrass under Drought Stress

TANG Ya-nan, HAN Lu, DUAN Meng-qi, DU Guang-qi, XU Li-xin*, HAN Lie-bao

(School of Grassland Science of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Appropriate concentrations of ethephon can improve the drought tolerance of turfgrasses, but the specific mechanism of action remains unclear. As an osmotic regulator, proline plays an important role in plant responses to stress. In this study, Kentucky bluegrass (*Poa pratensis*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*) were used as materials. We examined the effects of ethephon on physiological indices of turfgrasses in response to drought stress, analyzed changes in the expression of genes related to proline biosynthesis and catabolism, and explored the role of proline in ethephon-improved drought resistance of turfgrasses. The results showed that ethephon alleviated the decrease of relative water content and the increase of electrolyte leakage of turfgrass leaves induced by drought stress, thus contributing to improved drought tolerance. Under drought stress, proline content increased in the two *Poa pratensis* cultivars, whereas the changes were inconsistent among *Lolium perenne* cultivars. Ethephon treatment down-regulated the expression of *Proline Dehydrogenase* (*Pro DH*) gene in *Poa pratensis* under drought stress, thereby inhibiting proline degradation. In conclusion, promoting proline accumulation by suppressing the expression of the *Pro DH* gene might be one of the mechanisms by which ethephon improves drought tolerance in *Poa pratensis*.

Key words: Ethephon; Turfgrass; Proline; Drought stress; Gene expression

乙烯利($C_2H_5ClO_3P$)是一种人工合成高效低毒的植物生长调节剂,不仅能调控植物生长发育,加

速果实成熟^[1],还可增强植物抗逆性,有效缓解机械损伤、冷害及干旱胁迫等逆境造成的伤害^[2]。研究

收稿日期:2025-11-11;修回日期:2025-12-15

基金项目:北京林业大学“5·5工程”科研创新团队项目(BLRC2023A04)资助

作者简介:唐雅楠(2001-),女,汉族,四川内江人,硕士研究生,主要从事草坪草抗逆生理研究, E-mail: 15983264071@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: liberisa@163.com

表明,乙烯利在提升红花玉兰(*Magnolia wufengensis*),日本结缕草(*Zoysia japonica*)的抗寒能力方面表现出积极作用^[3-4]。郭丽红等^[5-6]指出,外施乙烯利能够缓解干旱对玉米(*Zea mays*),甘蔗(*Saccharum officinarum*)的胁迫程度。然而,乙烯利提升植物抗性的具体作用机制并不明确。胡雯媚^[7]的研究发现,乙烯利通过提高小麦(*Triticum aestivum*)种子体内抗氧化酶活性尤其是超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性来增强小麦清除活性氧的能力,从而提高渗透调节物质含量和叶片含水量,增强小麦的抗旱能力。高娅楠等^[8]的研究表明,乙烯利通过提升草地早熟禾(*Poa pratensis*)脱氢抗坏血酸还原酶(Dehydroascorbate reductase, DHAR)在干旱胁迫下的表达量来提高草地早熟禾的抗旱性。

前期研究显示抗氧化酶在乙烯利对植物抗逆性提升过程中发挥一定作用,但脯氨酸(Proline, Pro)的相关研究较少。脯氨酸积累是植物在生物和非生物胁迫下的一种重要的代谢适应性机制,其主要功能是作为渗透调节物质,维持细胞内外渗透平衡,增强植物抗逆性^[9]。大量研究表明^[10-11],几乎所有的胁迫都会诱导植物体内脯氨酸含量的增加,从而在稳定细胞蛋白结构,降低细胞酸性等方面发挥重要作用,最终提高植物的抗性。因此,脯氨酸的代谢机制在草坪草响应逆境胁迫的过程中至关重要。乙烯利对于干旱胁迫下草坪草脯氨酸的影响和作用有待进一步研究。

草地早熟禾是一种优良的冷季型草坪草,具有分布广泛、耐修剪、叶片质地细腻等优良特性^[12],常被用作内蒙古及其他地区绿化和运动场草坪建植的主要草种之一^[13],但抗旱性相对较差,缺水会导致植物的生长发育受到抑制甚至处于休眠状态^[14-15]。多年生黑麦草(*Lolium perenne*)是禾本科黑麦草属的一种多年生疏丛型草本植物,具有分蘖快、外形美观、绿色期长、成坪速度快且草坪质量等优点,常作为暖季型草坪的混播组分,应用于庭院绿化及生态修复项目^[16]。然而,其耐旱性较弱^[17],加之全球极端天气频发,严重制约了推广应用。

本研究选择2种冷季型草坪草的4个不同品种,验证乙烯利对草坪草在干旱胁迫下的积极作用,比较相对含水量、电解质渗透率和脯氨酸含量的变化,分析脯氨酸合成代谢和降解代谢相关基因表达谱,初步研究脯氨酸在乙烯利影响草坪草耐旱性中的作用机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料

草地早熟禾‘Midnight’品种购于北京中农克劳沃运动场景观工程有限公司,‘Nuglade’品种购于北京绿冠公司。多年生黑麦草‘MS’和‘AST’品种均购于北京正道生态科技有限公司。

1.2 试验设计

本研究在北京林业大学温室开展,环境参数设定如下:光照强度 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光照时长14 h,相对湿度70%,昼夜温度分别为28℃和18℃。采用盆栽方式,花盆规格直径16 cm、高度20 cm,播种密度 $15\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,土壤基质为土:沙1:1(体积比)。播种完成后,每日早晚各浇水一次,待出苗后适当降低浇水频率,保持常规的养护管理至草坪成坪。每个品种挑选16盆生长状况良好的盆栽设置4个处理组,每个处理重复4次。

1.2.1 草地早熟禾 2个品种均设置4个浓度梯度:对照组叶片喷施足量的蒸馏水,处理组依次喷施浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (低浓度), $400\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (中浓度)和 $600\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (高浓度)的等量乙烯利浓液。喷施处理1天后,对草地早熟禾盆栽进行持续10天的干旱胁迫和2天的复水处理,分别于干旱胁迫开始当天(第0天),第5天,第10天,以及复水处理的第2天采集叶片样本,用于后续相关指标测定。

1.2.2 多年生黑麦草 设置4个不同的处理组:对照组(CK),乙烯利处理组(ETH),干旱处理组(Drought)以及乙烯利-干旱处理组(ETH-D)。CK组和Drought组喷施足量蒸馏水,ETH组与ETH-D组喷施浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的等量乙烯利溶液,喷施结束1天后进行首轮叶片取样。在后续处理中,CK组与ETH组保持正常浇水频率,Drought组和ETH-D组停止供水。分别于干旱胁迫第5天,第10天开展第2,3次叶片样本采集,随后进行2天的复水处理,完成最后一次采集。

1.3 测定指标与方法

取新鲜叶片,采用传统的烘干法进行叶片相对含水量(Relative water content, RWC)的测定^[18];按照Zhang等人^[19]的方法使用电导仪进行电解质渗透率(Electrolytic leakage, EL)的测定;采用酸性茚三酮比色法进行脯氨酸(Proline, Pro)的测定^[4]。

脯氨酸代谢途径相关基因表达量取自 Zhang 等^[20]同批样本的转录组测序、组装和注释数据,针对 $\Delta 1$ -吡咯琳-5-羧酸脱氢酶(*Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Dehydrogenase*, *P5CDH*), $\Delta 1$ -吡咯琳-5-羧酸还原酶(*Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Reductase*, *P5CR*),鸟氨酸- δ -转氨酶(*Ornithine- δ -aminotransferase*, *OAT*), $\Delta 1$ -吡咯琳-5-羧酸合成酶(*Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Synthase*, *P5CS*)和脯氨酸脱氢酶(*Proline Dehydrogenase*, *ProDH*)5个基因做了功能注释和基因表达分析。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021 进行数据统计,采用 IBM SPSS Statistics 27 软件对试验数据开展方差分析及单因素多重比较工作,试验结果以平均值结合标准误差的形式呈现;后续借助 Origin 2024 软件进行图形绘制,实现数据的可视化展示。

2 结果与分析

2.1 喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾响应干旱胁迫下生理指标的影响

2.1.1 相对含水量和电解质渗透率 如图 1a,c,草地早熟禾‘Midnight’和‘Nuglade’品种的相对含水量在第 10 天时显著下降($P<0.05$),说明干旱导致细胞失水。复水 2 天后 200 mg·L⁻¹组和 400 mg·L⁻¹组的相对含水量与未喷施乙烯利对照组的相对含水量相比显著上升($P<0.05$),600 mg·L⁻¹组基本不变,说明叶面喷施低浓度与中浓度的乙烯利溶液后,明显提升草地早熟禾叶片在复水条件下的水分吸收恢复能力,而高浓度的乙烯利处理对于相对含水量的稳定能力具有抑制作用,对于复水恢复无明显响应。

干旱胁迫 10 天后,两品种的电解质渗透率显著提升($P<0.05$),且均低于对照组(图 1b,d),说明乙烯利处理缓解了干旱胁迫带来的损伤。复水 2 天后,200 mg·L⁻¹组和 400 mg·L⁻¹组的电解质渗透率显著下降($P<0.05$),而 600 mg·L⁻¹组与对照组相比无明显差异,说明低、中浓度的乙烯利处理能够加速复水后细胞膜损伤的修复进程。

2.1.2 脯氨酸含量 从图 2a,b 可知,在干旱胁迫至复水期间,对照组与 600 mg·L⁻¹组的脯氨酸含量持续累积,说明干旱促进了脯氨酸的积累,且高浓

度的乙烯利溶液对于干旱胁迫无明显响应。200 mg·L⁻¹组和 400 mg·L⁻¹组的脯氨酸含量在第 10 天时与对照组相比显著上升($P<0.05$),说明干旱胁迫下低、中浓度的乙烯利溶液可有效调控脯氨酸的合成代谢路径,展现出较高的作用敏感性。复水 2 天后,200 mg·L⁻¹组和 400 mg·L⁻¹组的脯氨酸含量与未喷施乙烯利的对照组相比显著下降($P<0.05$),说明低、中浓度的乙烯利溶液有助于草地早熟禾的复水恢复。

2.2 喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草响应干旱胁迫下生理指标的影响

2.2.1 相对含水量和电解质渗透率 ETH 组的相对含水量与对照组相比无显著差异(图 3a,c),说明叶片喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草‘MS’和‘AST’无影响;随着干旱处理时间的延长,Drought 组和 ETH-D 组的相对含水量在第 10 天时显著下降($P<0.05$),且复水 2 天之后叶片相对含水量迅速升高,说明干旱胁迫降低了叶片的相对含水量,破坏了植物体内的生理平衡,同时乙烯利处理缓解了干旱带来的损伤。

Drought 组和 ETH-D 组的电解质渗透率在第 10 天时与对照组相比差异显著($P<0.05$),且 ETH-D 组比 Drought 组增加更显著,说明干旱促进电解质渗透率的提高,乙烯利处理可减轻细胞膜的损伤,有助于增强多年生黑麦草的抗旱性(图 3b,d)。其他处理组在试验阶段的电解质渗透率与对照组相比无显著差异。

2.2.2 脯氨酸含量 干旱处理第 10 天时,多年生黑麦草的脯氨酸含量显著增加($P<0.05$)。‘MS’品种 Drought 组脯氨酸含量为对照组的 26.22 倍,ETH-D 组为对照组的 11.27 倍(图 4a),乙烯利并未提升干旱胁迫下该品种的脯氨酸含量;10 天干旱处理后,‘AST’品种脯氨酸含量上升到未浇水对照组的 18.49 倍,ETH-D 组上升到浇水对照组的 22.73 倍(图 4b)。

2.3 乙烯利溶液对草地早熟禾响应干旱胁迫下脯氨酸代谢相关基因表达的影响

高等植物中,脯氨酸的合成主要依赖谷氨酸和鸟氨酸两条途径(图 5),其差异源于底物的不同。当底物为谷氨酸(Glutamic acid, Glu)时,Glu 在 $\Delta 1$ -吡咯琳-5-羧酸合成酶(*Delta-1-Pyrroline-5-Carbox-*

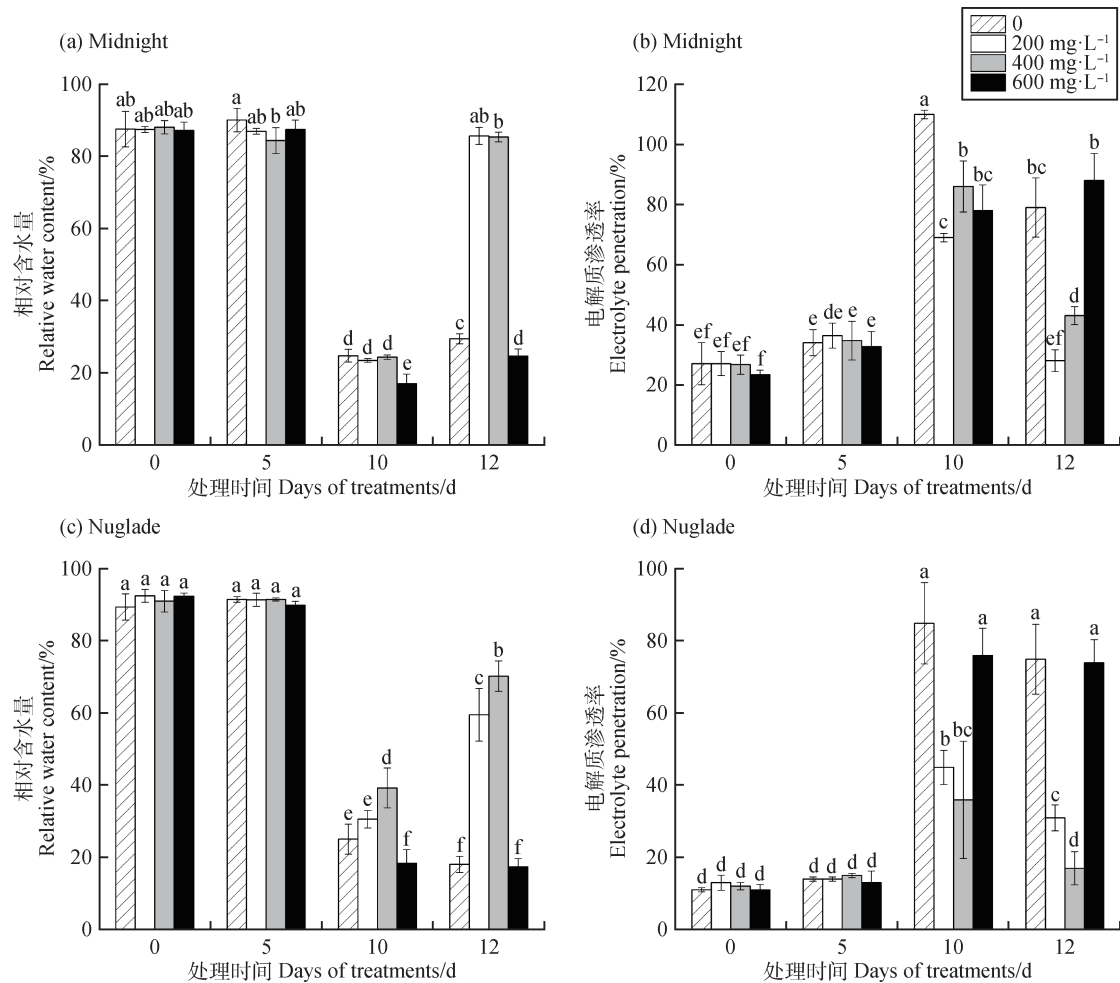


图1 不同浓度的乙烯利处理对干旱胁迫下草地早熟禾'Midnight'和'Nuglade'不同生理指标的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of ethephon treatment on various physiological indices of *Poa pratensis* 'Midnight' and 'Nuglade' under drought stress

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。图a表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Midnight'响应干旱胁迫下叶片相对含水量的影响;图b表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Midnight'响应干旱胁迫下电解质渗透率的影响;图c表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Nuglade'响应干旱胁迫下叶片相对含水量的影响;图d表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Nuglade'响应干旱胁迫下电解质渗透率的影响

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level, the same as below. Figure a shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the relative water content of leaves in *Poa pratensis* 'Midnight' in response to drought stress. Figure b shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the electrolyte leakage rate of *Poa pratensis* 'Midnight' in response to drought stress. Figure c shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the relative water content of leaves in *Poa pratensis* 'Nuglade' in response to drought stress. Figure d shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the electrolyte leakage rate of *Poa pratensis* 'Nuglade' in response to drought stress

ylate Synthase, P5CS)作用下转化为 γ -谷氨酸半醛(γ -Glutamyl Semialdehyde, GSA), GSA自发环化形成 Δ^1 -吡咯琳-5-羧酸(Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylic Acid, P5C),最终由 Δ^1 -吡咯琳-5-羧酸还原酶(Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Reductase, P5CR)催化生成脯氨酸(proline, Pro)。当底物为鸟氨酸(Ornithine, Orn)时, Orn经鸟氨酸- δ -转氨酶(Ornithine- δ -Aminotransferase, OAT)催化形成

GSA, 后续步骤与Glu途径一致。Pro的降解过程与合成途径相反, 在脯氨酸脱氢酶(Proline Dehydrogenase, Pro DH)作用下, Pro首先转化为P5C, P5C再自发转变为GSA, 最后经 Δ^1 -吡咯琳-5-羧酸脱氢酶(Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Dehydrogenase, P5CDH)的催化降解为Glu。喷施乙烯利溶液后的干旱处理组与干旱处理组对比, *Pro DH*基因表达下降, 抑制了脯氨酸的降解, 促进了脯氨酸的积累。

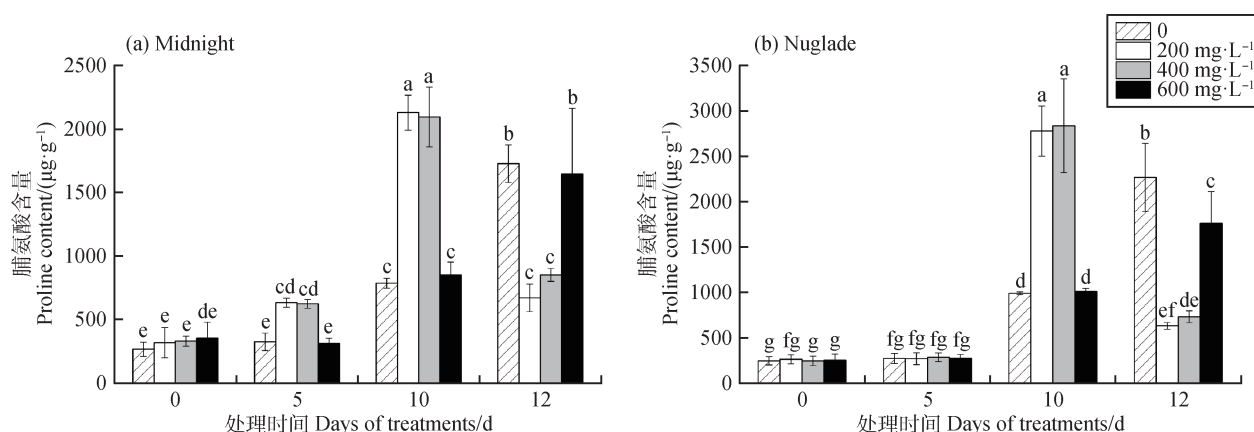


图2 乙烯利处理对干旱胁迫下草地早熟禾'Midnight'和'Nuglade'脯氨酸含量的影响

Fig. 2 Effects of ethephon treatment on proline content in *Poa pratensis* 'Midnight' and 'Nuglade' under drought stress
注:图a表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Midnight'响应干旱胁迫下脯氨酸含量的影响;图b表示喷施不同浓度的乙烯利溶液对草地早熟禾'Nuglade'响应干旱胁迫下脯氨酸含量的影响

Note: Figure a shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the proline content in *Poa pratensis* 'Midnight' in response to drought stress. Figure b shows the effect of spraying ethephon solutions with different concentrations on the proline content in *Poa pratensis* 'Nuglade' in response to drought stress

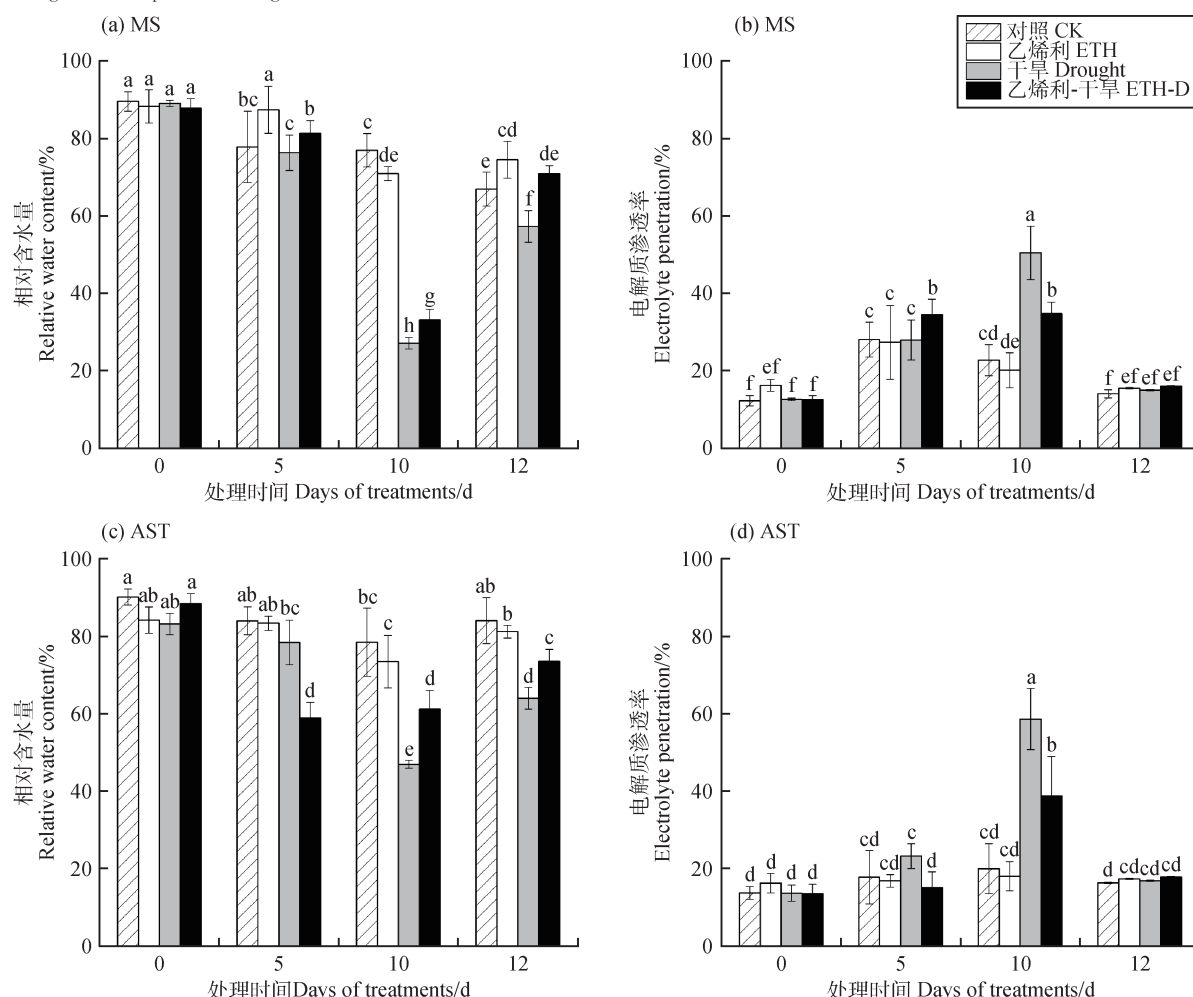


图3 乙烯利处理对干旱胁迫下多年生黑麦草'MS'和'AST'不同生理指标的影响

Fig. 3 Effects of ethephon treatment on different physiological indices in *Lolium perenne* 'MS' and 'AST' under drought stress
注:图a表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草'MS'响应干旱胁迫下叶片相对含水量的影响;图b表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草'MS'响应干旱胁迫下电解质渗透率的影响;图c表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草'AST'响应干旱胁迫下叶片相对含水量的影响;图d表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草'AST'响应干旱胁迫下电解质渗透率的影响

Note: Figure a shows the effect of spraying ethephon solution on the relative water content of leaves in *Lolium perenne* 'MS' in response to drought stress. Figure b shows the effect of spraying ethephon solution on the electrolyte leakage rate of *Lolium perenne* 'MS' in response to drought stress. Figure c shows the effect of spraying ethephon solution on the relative water content of leaves in *Lolium perenne* 'AST' in response to drought stress. Figure d shows the effect of spraying ethephon solution on the electrolyte leakage rate of *Lolium perenne* 'AST' in response to drought stress

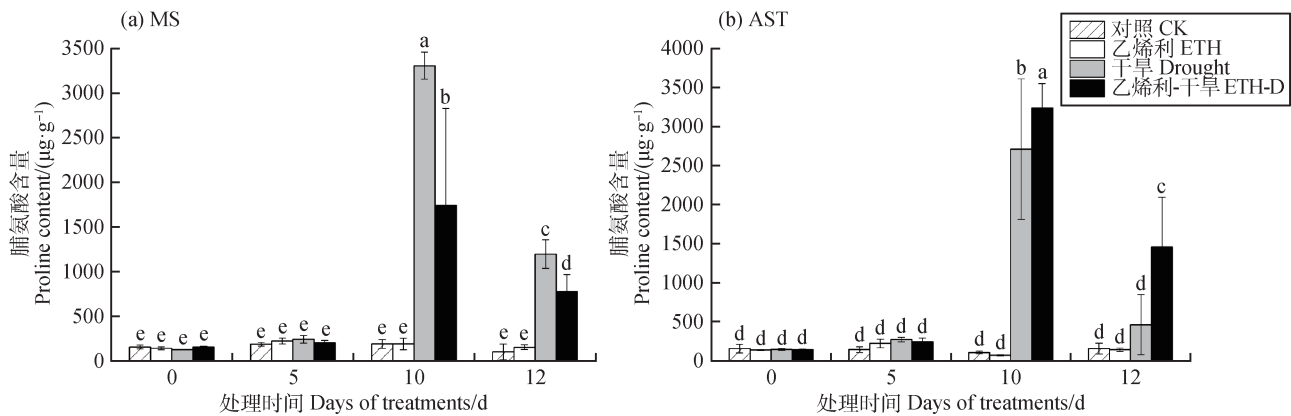


图4 乙烯利处理对干旱胁迫下多年生黑麦草‘MS’和‘AST’脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of ethephon treatment on proline content in *Lolium perenne* ‘MS’ and ‘AST’ under drought stress

注:图a表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草‘MS’响应干旱胁迫下脯氨酸含量的影响;图b表示喷施乙烯利溶液对多年生黑麦草‘AST’响应干旱胁迫下脯氨酸含量的影响

Note: Figure a shows the effect of spraying ethephon solution on the proline content in *Lolium perenne* ‘MS’ in response to drought stress. Figure b shows the effect of spraying ethephon solution on the proline content in *Lolium perenne* ‘AST’ in response to drought stress

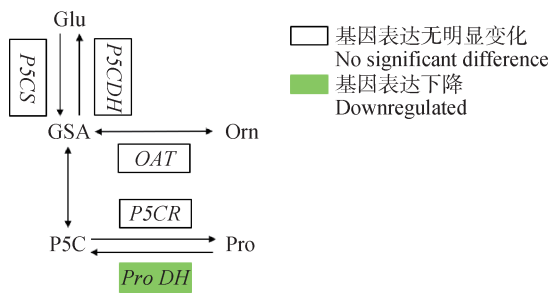


图5 乙烯利-干旱处理对比干旱处理对草地早熟禾脯氨酸代谢相关基因表达的影响

Fig. 5 Effects of ethephon-drought treatment versus drought treatment on the expression of proline metabolism-related genes in *Poa pratensis*

注:Glu,谷氨酸;GSA,γ-谷氨酸半醛;Orn,鸟氨酸;P5C,Δ1-吡咯琳-5-羧酸;Pro,脯氨酸;P5CS,Δ1-吡咯琳-5-羧酸合成酶;P5CDH,Δ1-吡咯琳-5-羧酸脱氢酶;OAT,鸟氨酸-δ-转氨酶;P5CR,Δ1-吡咯琳-5-羧酸还原酶;Pro DH,脯氨酸脱氢酶

Note: Glu, Glutamic acid; GSA, γ-Glutamyl Semialdehyde; Orn, Ornithine; P5C, Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylic Acid; Pro, proline; P5CS, Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Synthase; P5CDH, Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Dehydrogenase; OAT, Ornithine-δ-Aminotransferase; P5CR, Delta-1-Pyrroline-5-Carboxylate Reductase; Pro DH, Proline Dehydrogenase

3 讨论

3.1 不同浓度乙烯利处理对草地早熟禾响应干旱胁迫下脯氨酸等生理指标的影响

脯氨酸作为关键的渗透调节物质,有助于维持细胞渗透压,减少水分流失,从而增强植株的抗旱能力^[21],同时最新研究显示其也具备抗氧化功能,对植物胁迫下ROS清除有一定作用^[22]。植物叶片

相对含水量可评估植物吸水能力和体内水分的变化,反映细胞代谢活性^[23],是体现植物生长发育状况和抗逆性的重要指标。当植物遭遇胁迫时,细胞膜结构与功能受损,膜通透性显著增加,细胞内物质大量外渗,引起电解质渗透率升高,因此电解质渗透率也可作为衡量植物胁迫程度的关键指标^[24]。乙烯利作为一种优质的植物生长调节剂,能显著增强作物的耐旱性,但由于不同植物物种及品种间的干旱适应性不同,乙烯利溶液的最适施用浓度也会有所差异。本研究在干旱胁迫下,草地早熟禾经过低、中浓度的乙烯利处理后,相对含水量显著下降,电解质渗透率上升,促进脯氨酸的积累,这与韩露^[25]的研究结果一致。在复水恢复过程中,高浓度乙烯利处理对相对含水量和电解质渗透率无明显影响,这可能是由于高浓度乙烯利打破了植物体内激素平衡,引发了一些负面效应,干扰了植物正常的生理代谢过程,导致其对干旱胁迫及复水的响应机制受阻。

3.2 乙烯利处理对多年生黑麦草响应干旱胁迫下脯氨酸等生理指标的影响

不同品种的多年生黑麦草在相同的干旱胁迫下,‘MS’品种的相对含水量显著减少,降低到30%,而‘AST’品种下降至60%,表明多年生黑麦草这两个品种耐旱性的差异。干旱胁迫期间,干旱处理组的电解质渗透率比乙烯利-干旱处理组上升更显著,说明乙烯利处理有助于缓解原生质膜透性的改变,减轻干旱胁迫诱导的细胞损伤。同时,两

个品种的脯氨酸含量均上升,但‘AST’品种乙烯利-干旱处理组的脯氨酸积累量大于干旱处理组,说明乙烯利处理促进了干旱胁迫下脯氨酸的积累,提高了多年生黑麦草的抗旱性;而‘MS’品种干旱处理组的脯氨酸积累量大于乙烯利-干旱处理组,与‘AST’品种相反,说明乙烯利对不同遗传背景的多年生黑麦草品种作用效果不同,具体调控机制有待进一步研究。

3.3 乙烯利溶液对草地早熟禾响应干旱胁迫下脯氨酸代谢相关基因表达的影响

从基因表达层面来看,脯氨酸的合成代谢与降解代谢都受到限速酶的调节。喷施乙烯利溶液后的干旱处理组与干旱处理组对比,*Pro DH*基因表达下降。*Pro DH*是脯氨酸分解代谢的限速酶,催化脯氨酸分解的第一步反应^[26]。乙烯利调控干旱胁迫下,*Pro DH*基因下调表达,抑制脯氨酸的降解,促进脯氨酸的积累,这与本研究植株检测的脯氨酸含量生理指标的变化一致。

4 结论

叶片喷施低浓度的乙烯利溶液可提升草坪草的抗旱性。当草地早熟禾和多年生黑麦草受到干旱胁迫时,乙烯利可抑制叶片相对含水量的下降和电解质渗透率的上升,有助于干旱后的复水恢复。乙烯利下调脯氨酸脱氢酶(*Pro DH*)基因的表达,抑制脯氨酸降解,促进草地早熟禾干旱胁迫下脯氨酸的积累,有助于提升干旱胁迫下的抗氧化和渗透调节能力。乙烯利对多年生黑麦草不同耐旱性品种提升耐旱性的作用机制不同。对于耐旱性敏感的多年生黑麦草品种,乙烯利对干旱胁迫下脯氨酸含量无影响,因此,乙烯利可能通过其他机制,如抗氧化系统等缓解干旱胁迫诱导损伤。

参考文献

- [1] 时蕾,黄金越,于水云,等. 采前喷施乙烯利对树上干杏果实品质及贮藏特性的影响[J]. 中国果树,2024(12):43-49
SHI L, HUANG J Y, YU S Y, et al. Effects of pre-harvest spraying ethephon on fruit quality and storage characteristics of ‘Shushanggan’ apricot[J]. China Fruits,2024(12):43-49
- [2] 李进超,张智韦,张嘉航,等. 乙烯利对结缕草响应低温胁迫的作用[J]. 草业科学,2023,40(12):3000-3008
LI J C, ZHANG Z W, ZHANG J H, et al. The effect of spraying ethephon on low temperature stress in *Zoysia Japonica*[J].

- Pratacultural Science,2023,40(12):3000-3008
- [3] 何著书. 几种调控措施对红花玉兰抗寒性的影响[D]. 北京:北京林业大学,2017:14-35
HE Z S. Effects of control measures on cold resistance of *Magnolia wufengensis* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017:14-35
- [4] 刘文. 乙烯利对日本结缕草低温胁迫响应的影响[D]. 北京:北京林业大学,2019:17-95
LIU W. Application of ethephon impact zoysiagrass responses to cold stress [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019: 17-95
- [5] 郭丽红,王定康,杨晓虹,等. 外源乙烯利对干旱胁迫过程中玉米幼苗某些抗逆生理指标的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版),2004,26(4):352-356
GUO L H, WANG D K, YANG X H, et al. Effects of exogenous ethylene on some physiology indexes of resistance stress during drought stress in maize seedlings[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2004,26(4):352-356
- [6] 吴凯朝,叶燕萍,李杨瑞,等. 喷施乙烯利对甘蔗群体冠层结构及一些抗旱性生理指标的影响[J]. 西南农业学报,2004,17(6):724-729
WU K C, YE Y P, LI Y R, et al. Effects of spraying ethephon on the canopy structure and the physiological indexes for drought resistance in sugarcane[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2004,17(6):724-729
- [7] 胡雯媚. 西南地区小麦品种苗期抗旱性筛选及乙烯利浸种对干旱胁迫下小麦根系的转录组分析[D]. 雅安:四川农业大学,2017:34
HU W M. Screening of drought resistance of wheat varieties in southwest China at seedling stage and transcriptome analysis of seed soaking with ethephon on wheat roots under drought stress [D]. Yaan:Sichuan Agricultural University,2017:34
- [8] 高娅楠,韩烈保,许立新. 乙烯利对干旱胁迫下草地早熟禾抗氧化酶基因表达的影响[J]. 草地学报,2021,29(10):2200-2213
GAO Y N, HAN L B, XU L X. Effects of ethephon on the antioxidant enzyme genes expression of *Poa pratensis* under drought stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10): 2200-2213
- [9] 张林,陈翔,吴宇,等. 脯氨酸在植物抗逆中的研究进展[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2023,51(1):42-51
ZHANG L, CHEN X, WU Y, et al. Research progress of proline in plant stress resistance[J]. Journal of Jiangnan University Natural Science Edition,2023,51(1):42-51
- [10] BOUDMYXAY K,沈镭,钟帅,等. 脯氨酸引发提高烟草种子和幼苗抗逆性及其与抗氧化系统的关系[J]. 山西农业科学,2019,47(1):39-48
BOUDMYXAY K, SHEN L, ZHONG S, et al. Improving the antioxidant system and its stress resistance to tobacco seeds and seedling by proline priming[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2019,47(1):39-48
- [11] 赵小强,钟源,周文期,等. 外源脯氨酸诱导提高玉米对低温

- 胁迫的生理响应[J]. 分子植物育种, 2023, 21(5): 1675-1684
- ZHAO X Q, ZHONG Y, ZHOU W Q, et al. Exogenous proline induced improvement of physiological response in maize (*Zea mays*) under low-temperature stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(5): 1675-1684
- [12] 叶文兴, 张胜男, 刘雪婷. 12个草地早熟禾品种幼苗耐盐性分析[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2740-2747
- YE W X, ZHANG S N, LIU X T. Analysis on salt tolerance of 12 *Poa pratensis* varieties at seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2740-2747
- [13] 黄丽, 王璐, 李存福, 等. 北京地区早熟禾属植物种质资源研究[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 760-765
- HUANG L, WANG L, LI C F, et al. Germplasm resources of genus *Poa* L. in Beijing area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(5): 760-765
- [14] CENZANO A M, VARELA M C, BERTILLER M B, et al. Effect of drought on morphological and functional traits of *Poa ligularis* and *Pappostipa speciosa*, native perennial grasses with wide distribution in *Patagonian rangelands*, Argentina [J]. Australian Journal of Botany, 2013, 61(5): 383-393
- [15] 马媛, 张嘉航, 高娅楠, 等. 干旱胁迫下乙烯利对草地早熟禾叶绿素代谢基因表达的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(12): 1-10
- MA Y, ZHANG J H, GAO Y N, et al. Effect of ethephon on chlorophyll metabolism genes expression of Kentucky bluegrass under drought stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(12): 1-10
- [16] 熊心玥, 郭倩倩. 多年生黑麦草果聚糖代谢及其参与植物抗逆作用的研究进展[J]. 中国草地学报, 2025, 47(8): 120-131
- XIONG X Y, GUO Q Q. Advances in fructan metabolism in perennial ryegrass and its role in stress tolerance[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(8): 120-131
- [17] 关昊, 姚佳明, 张欣桢, 等. 多年生黑麦草 *LpPIL15-like* 基因转录模式及耐逆功能分析[J]. 中国草地学报, 2024, 46(2): 24-34
- GUAN H, YAO J M, ZHANG X Y, et al. Analysis of the transcription pattern and resistance function of *LpPIL15-like* gene in perennial ryegrass [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(2): 24-34
- [18] DACOSTA M, HUANG B R. Changes in antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation for bentgrass species in response to drought stress[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2007, 132(3): 319-326
- [19] ZHANG X Z, WANG K H, ERVIN E H. Bermudagrass freezing tolerance associated with abscisic acid metabolism and dehydrin expression during cold acclimation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2008, 133(4): 542-550
- [20] ZHANG J H, GAO Y N, XU L X, et al. Transcriptome analysis of Kentucky bluegrass subject to drought and ethephon treatment[J]. PLoS One, 2021, 16(12): e0261472
- [21] ZHANG N, HAN L, XU L X, et al. Ethephon seed treatment impacts on drought tolerance of Kentucky bluegrass seedlings[J]. HortTechnology, 2018, 28(3): 319-326
- [22] 郭琪, 刘悦, 孙楠, 等. 脯氨酸在植物抵御非生物胁迫诱导的氧化应激中的作用[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(11): 2085-2095
- GUO Q, LIU Y, SUN N, et al. The role of proline in plant resistances to oxidative stress induced by abiotic stresses [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(11): 2085-2095
- [23] 段梦琪, 彭春, 张睿, 等. 乙烯利对干旱条件下多年生黑麦草生理指标的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 333-341
- DUAN M Q, PENG C, ZHANG R, et al. Effects of ethephon on physiological indexes of perennial ryegrass under drought conditions [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 333-341
- [24] 韩露, 韩烈保, 许立新. 乙烯利影响植物抗旱性研究进展[J]. 草地学报, 2013, 21(4): 631-636
- HAN L, HAN L B, XU L X. Effects of ethephon treatment on plant drought tolerance (review) [J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(4): 631-636
- [25] 韩露. 乙烯利对草地早熟禾 (*Poa pratensis* L.) 抗旱性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 43
- HAN L. Effects of ethephon treatment on drought resistance of [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014: 43
- [26] 许祥明, 叶和春, 李国凤. 脯氨酸代谢与植物抗渗透胁迫的研究进展[J]. 植物学通报, 2000, 17(6): 536-542
- XU X M, YE H C, LI G F. Progress in synthesis and metabolism of proline and its relationship with osmotolerance of plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 17(6): 536-542

(责任编辑 刘婷婷)