



油菜素内脂对于旱胁迫下护坡植物高羊茅生理特性的调控效应

李铭怡 贾濠基 董文豪 郭士维 王福豪 刘黎明 夏栋 许文年

Regulatory effects of brassinolide on the physiological characteristics of *Festuca arundinacea*, a slope protection plant, under drought stress

LI Mingyi, JIA Haoji, DONG Wenhao, GUO Shiwei, WANG Fuhao, LIU Liming, XIA Dong, XU Wennian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0577>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐胁迫下3种外源物对高羊茅生理指标的影响

Effects of three exogenous substances on the physiological indexes of tall fescue under salt stress

草业科学. 2022, 39(4): 720 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0537>

外源激素对于旱胁迫下黑麦草生理特性的影响及抗旱性评价

Effects of exogenous hormones on physiological characteristics and drought resistance of *Lolium perenne* under drought stress

草业科学. 2024, 41(2): 425 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0928>

外源柠檬酸缓解高羊茅盐胁迫的机制

Mechanism of exogenous citric acid alleviating salt stress in *Festuca arundinacea*

草业科学. 2023, 40(2): 511 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0395>

干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性

Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress

草业科学. 2023, 40(5): 1349 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0701>

高羊茅根际耐旱促生菌的分离鉴定及其促生作用

Isolation and identification of drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria from tall fescue and their growth-promoting effects

草业科学. 2024, 41(11): 2576 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0455>

LED光照强度对高羊茅生长及生理特性的影响

Effects of the light intensity of LEDs on the growth and physiological characteristics of tall fescue

草业科学. 2024, 41(11): 2594 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0260>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0577

李铭怡, 贾濠基, 董文豪, 郭士维, 王福豪, 刘黎明, 夏栋, 许文年. 油菜素内脂对干旱胁迫下护坡植物高羊茅生理特性的调控效应. 草业科学, 2025, 42(1): 140-151.

LI M Y, JIA H J, DONG W H, GUO S W, WANG F H, LIU L M, XIA D, XU W N. Regulatory effects of brassinolide on the physiological characteristics of *Festuca arundinacea*, a slope protection plant, under drought stress. Pratacultural Science, 2025, 42(1): 140-151.

油菜素内脂对干旱胁迫下护坡植物高羊茅生理特性的调控效应

李铭怡^{1,2}, 贾濠基^{1,2}, 董文豪³, 郭士维^{1,2}, 王福豪^{1,2},
刘黎明^{1,2}, 夏栋^{3,4}, 许文年^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 3. 湖北润智生态科技有限公司, 湖北宜昌 443002; 4. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 干旱严重限制边坡生态修复进程, 影响护坡植物正常生长发育, 油菜素内酯在提高植物抗旱性方面发挥着积极作用。为探究油菜素内酯增强干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅(*Festuca arundinacea*)抗旱能力的作用机理, 本研究以高羊茅为试验材料, 通过盆栽试验, 设置3种水分梯度(正常水分、轻度干旱和重度干旱)与4种油菜素内酯浓度(0、0.05、0.2、0.5 mg·L⁻¹)处理, 研究油菜素内酯对干旱胁迫下高羊茅株高、生物量、光合特性及部分渗透调节物质和抗氧化物的影响。结果表明: 在植被混凝土中随干旱胁迫程度的加剧和胁迫时间的延长, 高羊茅的生长受到抑制且生理性能下降; 油菜素内酯处理显著增加($P < 0.05$)干旱胁迫下高羊茅的株高、生物量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和脯氨酸含量, 降低高羊茅叶片中的胞间CO₂浓度和丙二醛含量, 有效提高植被混凝土中高羊茅的抗旱能力, 且具有明显的浓度效应。其中正常水分和轻度干旱胁迫以喷施0.2 mg·L⁻¹油菜素内酯对高羊茅生长促进效果最佳, 重度干旱胁迫以喷施0.05 mg·L⁻¹油菜素内酯效果最佳。研究初步揭示了油菜素内酯对干旱胁迫下高羊茅生理特性的影响, 为将外源植物激素油菜素内酯引入植被混凝土生态边坡修复中提供了参考。

关键词: 干旱胁迫; 植被混凝土; 油菜素内酯; 高羊茅; 光合特性; 渗透调节; 边坡修复

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)01-0140-12

Regulatory effects of brassinolide on the physiological characteristics of *Festuca arundinacea*, a slope protection plant, under drought stress

LI Mingyi^{1,2}, JIA Haoji^{1,2}, DONG Wenhao³, GUO Shiwei^{1,2}, WANG Fuhao^{1,2},
LIU Liming^{1,2}, XIA Dong^{3,4}, XU Wennian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education (China Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Cement-based Ecological Restoration Technology (China Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei, China; 3. Hubei Runzhi Ecological Technology Co., Ltd, Yichang 443002, Hubei, China; 4. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Tall fescue (*Festuca arundinacea*) was used as experimental material in this study to explore the mechanism by which brassinolide enhances its drought resistance when grown in vegetation concrete under drought stress. A pot experiment

收稿日期: 2023-10-23 接受日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207544); 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心开放基金项目(2022SNJ09)

通信作者: 李铭怡(1988-), 女, 河北邯郸人, 副教授, 博士, 主要从事边坡与生态防护研究。E-mail: limingyi@ctgu.edu.cn

was conducted to investigate the effects of brassinolide on plant height, biomass, photosynthetic characteristics, and certain osmotic adjustment substances and antioxidants of tall fescue under drought stress by setting treatments with three water gradients (well water, mild drought, and severe drought) and four concentrations of brassinolide (0, 0.05, 0.2, and 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The results showed that the growth of tall fescue was inhibited, and the physiological performance decreased with the aggravation of drought stress and prolongation of stress time in vegetation concrete. Brassinolide treatment significantly increased ($P < 0.05$) the plant height, biomass, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and proline content of tall fescue under drought stress, reduced the intercellular CO_2 concentration and malondialdehyde content in the leaves of tall fescue, effectively improved the drought resistance of tall fescue grown in vegetation concrete, and had a significant concentration effect. Spraying 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ brassinolide under normal water and mild drought stress had the best effect on the growth of tall fescue, while spraying 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ brassinolide under severe drought stress had the best effect. This preliminary study revealed the effect of brassinolide on the physiological characteristics of tall fescue under drought stress, providing a research basis for using the exogenous phytohormone brassinolide in the ecological slope restoration of vegetation concrete.

Keywords: drought stress; vegetation concrete; brassinolide; tall fescue; photosynthetic properties; osmoregulatory substance; slope restoration

Corresponding author: LI Mingyi E-mail: limingyi@ctgu.edu.cn

植被混凝土是根据修复区域边坡特性和景观需求等, 将土壤、水泥、有机物料、生境基材改良剂、植绿种子等按特定比例混合, 铺设铁丝网和固定锚钉, 利用喷播设备喷射到坡面, 进行植被复绿和边坡防护的生态修复技术^[1], 因其兼具工程防护与生态绿色双重功能、修复效果可持续性良好成为实施生态恢复的有效手段之一^[2]。良好的生态恢复效果推动了技术的大面积应用, 但在长期的应用实践中却出现了基材活性不高、稳定性差, 养分含量较低等问题^[3], 研究者们采取了一些方法, 包括引入 AB (activation bacterium) 菌肥^[4] 和微生物^[5] 以改善基材 pH、提升土壤肥力, 以及增强植株抗逆性; 此外, 通过添加生物碳^[6]、椰纤维^[7] 等外部掺料提高基材抗剪强度、养分含量及固持能力。而在植被恢复初期, 由于高陡的地形, 导致坡面水分未充分下渗即形成地表径流, 且由于基材蒸散效应, 植物易处于干旱胁迫环境中^[8]; 同时干旱胁迫导致植物失水, 光合速率下降、渗透失衡、膜系统受损和生长减缓^[9], 这些均为限制植被混凝土生态修复技术中植被群落重建和恢复进程的关键因素。外源植物激素可以有效提高植物的抗逆性^[10-12], 因此, 将天然植物激素引入植被混凝土生态修复技术中, 以提高护坡植物的抗逆性, 已成为当前研究的重点。

油菜素内酯 (brassinolide, BR) 是一种新型植物生长素, 广泛存在于植物体不同器官中, 能够刺激

细胞质膜上三磷酸腺苷酶 (ATP) 活性, 增加细胞壁可塑性, 使细胞伸长^[13], 提高实际光化学效率 (Φ_{PSII}), 激活碳酸酐酶和核酮糖二磷酸缩化酶 (RuBisco) 活性等非气孔因素, 提高植物的光合作用能力^[14], 增强植物抗逆性, 能够有效缓解所受逆境胁迫的伤害^[15]。在低温胁迫下, BR 处理后能明显减缓黄瓜 (*Cucumis sativus*) 幼苗细胞膜脂过氧化程度, 提高叶绿素含量和光合能力, 增强其耐受性^[16]。应用 BR 可修复因涝渍、干旱和盐胁迫所导致的光合系统损伤, 提高叶片净光合速率、降低气孔导度, 提高豇豆 (*Vigna unguiculata*) 抗逆性^[17]。通过 BR 预处理可增强葡萄 (*Vitis vinifera*) 叶片抗氧化酶活性, 提高植物体内渗透调节物质含量保持细胞的持水能力, 减少丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 的产生, 其抗旱能力显著提高^[18]; BR 还可以通过促进干旱胁迫下烟草 (*Nicotiana tabacum*) 幼苗根系形态发育, 提升株高, 地上、地下干质量, 增大叶面积来提高其适应能力^[19]。此外 BR 在水稻 (*Oryza sativa*)^[20]、玉米 (*Zea mays*)^[21]、辣椒 (*Capsicum annuum*)^[22] 等农业方面也有相关研究报告, 而针对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 生理影响的应用及报道鲜见。

高羊茅是多年生禾本科草本植物, 抗旱、耐贫瘠、抗病性强^[23], 被广泛应用于水土保持、生态修复等领域。而 BR 能否增强干旱条件下植被混凝土中的高羊茅的抗逆性, 有待进一步研究; 因此, 本研究

以高羊茅为试验材料,探究干旱胁迫下 BR 对其生理特性的影响,并通过主成分综合评价分析方法筛选出不同干旱程度下最适 BR 浓度,以期将 BR 运用到植被混凝土边坡生态修复中提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试植物为高羊茅,种子由植被混凝土护坡工程项目提供。涉及的主要材料包括种植土、水泥、有机物料、改良剂和水。所用种植土为湖北省宜昌市本地黄棕壤土,经风干、去除根系、石子等杂质,粉碎后过 2 mm 筛备用,种植土理化性质为 pH 7.65,容重为 $1.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机碳含量为 $7.63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $0.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水泥采用华新水泥(宜昌)有限公司生产的 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,有机物料选用锯末,购自宜昌华新木材厂,改良剂采用湖北润智生态科技有限公司生产的专利产品润智生态剂,试验用水采用自来水。配置方案参照国家现行能源行业标准《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范》(NB/T 35082—2016),所配置的植被混凝土各干料质量比为种植土:水泥:有机物料:改良剂 = 100:8:6:4。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,将配置好的植被混凝土进行装盆,盆栽分为两层,先铺基层(不含种子),再铺面层(含种子),对种植好的植物每天浇水养护,待植物生长 14 d 后采用称重法控制水分,模拟不同干旱程度;3 个水分梯度分别设置为田间最大持水量的 75% (正常水分, WW)、55% (轻度干旱, LD)、35% (重度干旱, SD)^[24-25];干旱处理开始同时分别喷施 3 种不同浓度的 BR: T_1 ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 T_2 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 T_3 ($0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[26-27],以喷施清水作为对照(CK),喷施程度为叶片和茎表面充分湿润但无液滴凝聚下落,每天一次连续 3 d;试验共计 12 个处理,每个处理 3 个重复,总计 108 盆,每盆装土 2.3 kg。干旱胁迫处理次日开始计算胁迫时间,分别于胁迫 30、60、90 d 进行植物株高、生物量、光合指标、MDA 和脯氨酸(proline, Pro)的测定与分析。

1.3 指标测定及方法

于干旱胁迫 30、60、90 d 时每盆选取 3 株长势

相当的植株,每个处理测定 9 个植株,测量株高,将植株从基径处分为地上和地下两部分,用清水清洗,擦拭干净后,用分析天平分别称量各个部分鲜质量。

采用 LI-6400 便携式光合仪,设置固定光强为 $1000 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,于胁迫 30、60、90 d 上午 09:00—11:00,测定高羊茅功能叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s),每个处理 3 个重复;MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[28],Pro 含量采用酸性茚三酮比色法测定^[29]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 统计数据,使用 Origin 2023b 作图;用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析检验不同处理间显著性,并进行 Pearson 相关性分析和主成分分析。

2 结果

2.1 油菜素内酯对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅株高的影响

高羊茅的株高随胁迫程度的加剧而下降,在 BR 处理下植物株高有所提升,但较高浓度的 BR 则对高羊茅生长有一定的抑制作用。胁迫 30 d 时,正常水分 T_2 、 T_3 处理较 CK 显著提高 17.38% 和 21.72% ($P < 0.05$),而重度干旱胁迫下 T_3 处理较 CK 下降 12.33%。在胁迫 60 d 时,正常水分和重度干旱胁迫下各处理组间无显著差异 ($P > 0.05$);胁迫 90 d 时,正常水分和轻度干旱胁迫下 T_2 处理较 CK 株高增幅最大,分别显著提高 14.98% 和 15.26%,而重度干旱胁迫下仅 T_1 处理显著高于 CK (表 1)。

2.2 油菜素内酯对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅生物量的影响

随胁迫时间的延长,高羊茅地上、地下生物量整体呈增加趋势,BR 处理对干旱胁迫下高羊茅生物量产生了显著影响 ($P < 0.05$)。与 CK 相比,正常水分和轻度干旱胁迫下 T_2 处理地上和地下生物量分别增加了 6.38%~28.78% 和 1.34%~19.99%,但这种现象仅在胁迫至 90 d 时才呈现出显著差异。此外在重度干旱胁迫下 T_1 、 T_2 和 T_3 处理对高羊茅地上生物量均有促进作用,而较高浓度 BR 则对地下生物量具有一定抑制作用,在胁迫至 90 d 时, T_2 和 T_3 处理地下生物量较 CK 分别下降了 4.9% 和 7.93% (图 1)。

表 1 干旱胁迫和油菜素内酯处理对高羊茅株高的影响
Table 1 Effects of drought stress and brassinolide treatment on plant height of *Festuca arundinacea*

干旱胁迫处理 Drought stress treatment	油菜素内酯处理 Treatment of brassinolide	干旱胁迫时间 Drought stress time		
		30 d	60 d	90 d
WW	CK	30.67 ± 3.22Ca	35.67 ± 4.51Aa	42.33 ± 1.16Ba
	T ₁	31.67 ± 2.08BCa	37.00 ± 3.46Aa	45.00 ± 2.65ABa
	T ₂	36.00 ± 2.65ABa	39.67 ± 2.08Aa	48.67 ± 1.53Aa
	T ₃	37.33 ± 2.52Aa	42.00 ± 3.61Aa	48.00 ± 2.65Aa
LD	CK	26.33 ± 3.06Ba	33.33 ± 3.06Ba	39.33 ± 2.08Ca
	T ₁	28.33 ± 3.06ABab	35.33 ± 1.53ABab	41.33 ± 1.16BCab
	T ₂	29.33 ± 2.08ABb	38.00 ± 2.00Aa	45.33 ± 1.53Aa
	T ₃	32.33 ± 3.06Ab	39.00 ± 2.00Aa	43.33 ± 2.52ABa
SD	CK	24.33 ± 3.06ABa	30.33 ± 3.22Aa	33.67 ± 2.52Bb
	T ₁	25.67 ± 1.53Ab	31.67 ± 1.53Ab	39.33 ± 2.08Ab
	T ₂	22.00 ± 1.73ABc	33.00 ± 2.65Ab	37.00 ± 3.00ABb
	T ₃	21.33 ± 1.53Bc	31.00 ± 2.00Ab	35.67 ± 3.06ABb

WW: 正常水分; LD: 轻度干旱; SD: 重度干旱; CK: 对照组; T₁: 喷施0.05 mg·L⁻¹油菜素内酯; T₂: 喷施0.2 mg·L⁻¹油菜素内酯; T₃: 喷施0.5 mg·L⁻¹油菜素内酯。不同小写字母表示在同一时间同一油菜素内酯浓度处理不同干旱程度下差异显著(P < 0.05), 不同大写字母表示在同一时间同一干旱程度不同油菜素内酯浓度处理间差异显著(P < 0.05); 下同。

WW: well water; LD: mild drought; SD: severe drought; CK: control group; T₁: sprayed with 0.05 mg·L⁻¹ BR; T₂: sprayed with 0.2 mg·L⁻¹ BR; T₃: sprayed with 0.5 mg·L⁻¹ BR. Different lowercase letters indicate significant differences between different drought severities under the same BR concentration for the same time at the 0.05 level, and different capital letters indicate significant differences between different BR concentrations at the same time and the same drought severity at the 0.05 level. This is applicable for the following figures and tables as well.

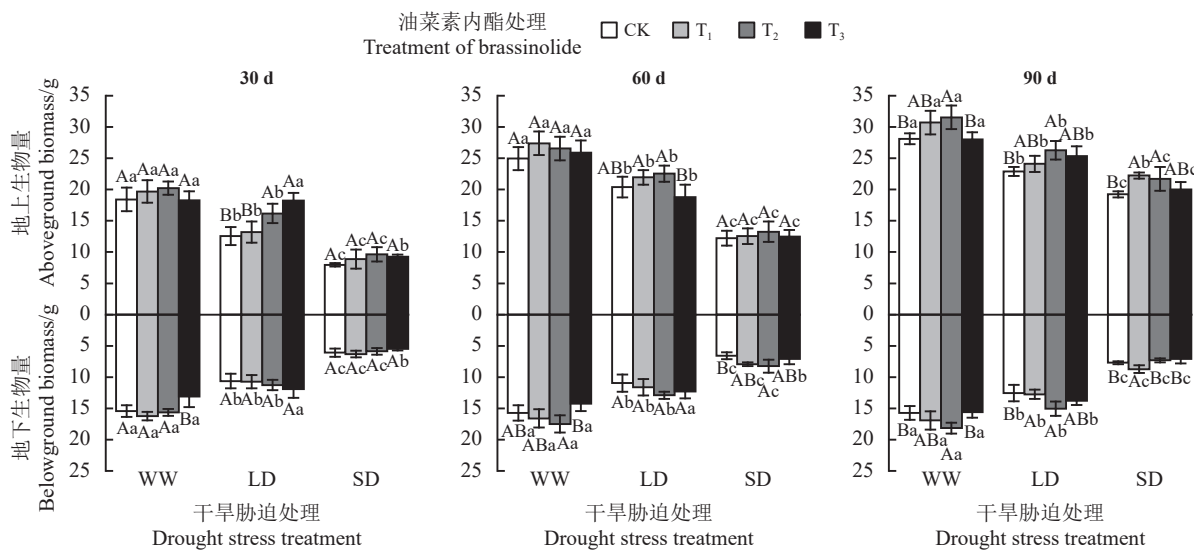


图 1 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅生物量的影响

Figure 1 Effects of brassinolide on the biomass of *Festuca arundinacea* under different drought stresses

2.3 油菜素内酯对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅光合特性的影响

2.3.1 高羊茅光合速率变化

随着干旱胁迫程度的加剧, 高羊茅 P_n 呈逐渐下降的趋势, 但不同浓度的 BR 处理对其有一定的缓解作用。在胁迫 30 d 时, 除正常水分 T₁ 处理和重度干

旱胁迫下 T₃ 处理较 CK 无显著差异外 (P > 0.05), 其余各组处理较 CK 均存在显著差异 (P < 0.05), 其中重度干旱胁迫下 T₂ 组增幅最大, 较 CK 提高了 35.18%, 其次是轻度干旱胁迫下 T₃ 处理和正常水分下 T₂ 处理, 分别较 CK 增加了 28.36% 和 23.45%。胁迫至 60 d 时, 在轻度干旱和重度干旱胁迫下各处理

P_n 较 CK 均显著增加。而胁迫至 90 d 时, 各干旱程度下不同处理趋势整体相同, 均随着 BR 喷施浓度的增加而先增后减, 在正常水分和轻度干旱胁迫 T_2 处理下 P_n 增至最高, 分别较 CK 显著增加了 23.68% 和 26.44%, 与之不同的是重度干旱胁迫下 T_1 处理 P_n 增至最高, 较 CK 增加了 4.55%, 但差异不显著 (图 2)。

2.3.2 高羊茅气孔导度变化

随着胁迫时间的延长高羊茅 G_s 整体呈上升趋势。胁迫 30 d 时, 不同干旱程度下各处理较 CK 均有所提升, 其中高羊茅 G_s 提升最大的是重度干旱胁迫下的 T_3 处理, 较 CK 提升了 27.32%, 其次是轻度干旱胁迫下 T_2 处理, 较 CK 提升了 25.17%。在胁迫 60 d 时, 正常水分下各处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。胁迫至 90 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫下 T_2 处理高羊茅 G_s 较 CK 分别显著提高了 7.38% 和 19.82%, 在重度干旱胁迫 T_1 、 T_2 、 T_3 处理下高羊茅 G_s 分别较 CK 增加了 15.05%、8.19% 和 4.04% (图 3)。

2.3.3 高羊茅胞间 CO_2 浓度变化

高羊茅的 C_i 随着干旱胁迫时间的延长、胁迫

程度的增加总体呈上升趋势。在胁迫 30 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫下各处理间 C_i 差异显著 ($P < 0.05$), 重度干旱胁迫下 T_1 、 T_2 、 T_3 处理 C_i 较 CK 分别下降了 10.68%、4.53% 和 1.27%。胁迫至 60 d 时, 在正常水分下 T_1 、 T_2 、 T_3 处理 C_i 较 CK 均显著下降, 分别下降了 10.08%、18.32% 和 6.79%。胁迫至 90 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫下 C_i 最低点均处于 T_2 处理, 分别较 CK 显著下降了 18.32% 和 13.98%, 与之不同的是在重度干旱胁迫下高羊茅 C_i 最低点存在于 T_1 处理, 较 CK 显著下降了 12.98% (图 4)。

2.3.4 高羊茅蒸腾速率变化

不同处理下高羊茅 T_r 随胁迫时间延长、胁迫程度增加而降低。在胁迫 30 d 时, 各干旱胁迫下 T_2 、 T_3 处理 T_r 均显著高于 CK ($P < 0.05$)。胁迫至 60 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫 T_2 处理下高羊茅 T_r 提升至最高, 较 CK 分别提高了 24.69% 和 16.32%, 但重度干旱胁迫下仅 T_1 处理较 CK 有所提升, 但并无显著差异 ($P > 0.05$), T_2 、 T_3 处理下 T_r 较 CK 有所

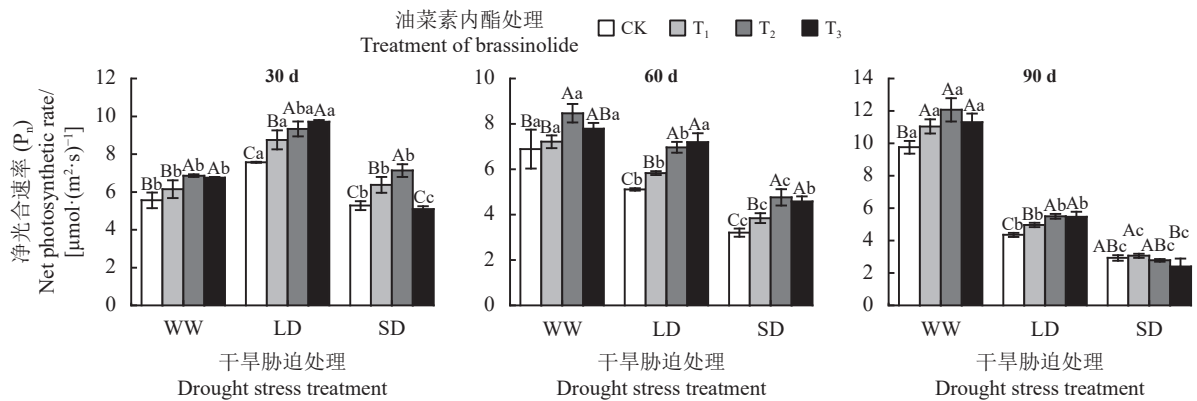


图 2 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅净光合速率的影响

Figure 2 Effects of brassinolide on the net photosynthetic rate of *Festuca arundinacea* under different drought stresses

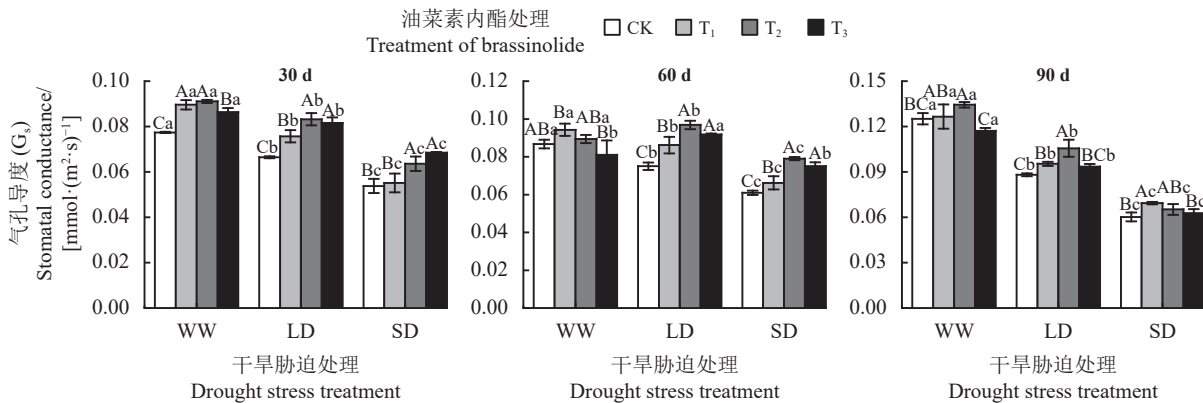


图 3 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅气孔导度的影响

Figure 3 Effects of brassinolide on the net stomatal conductance of *Festuca arundinacea* under different drought stresses

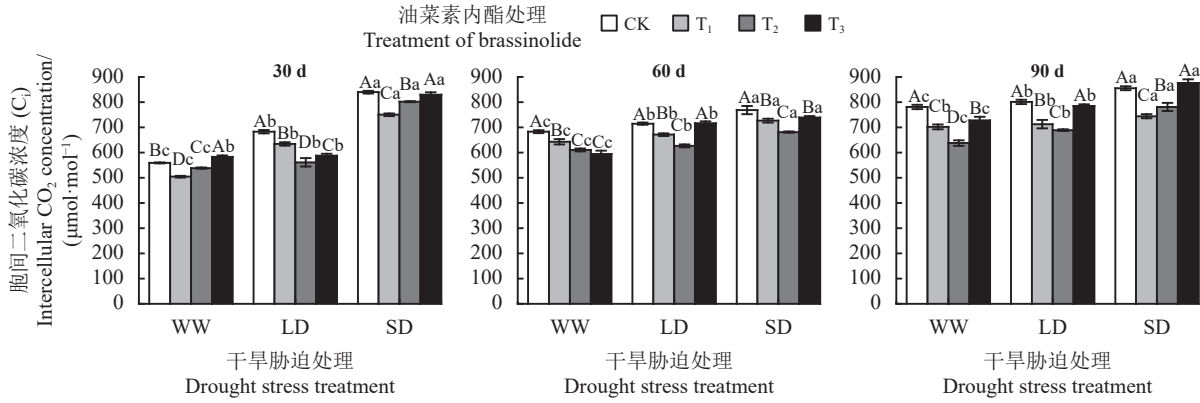


图 4 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅胞间 CO₂ 浓度的影响

Figure 4 Effect of brassinolide on the intercellular CO₂ concentration in *Festuca arundinacea* under different drought stresses

下降。胁迫至 90 d 时,正常水分各处理 T_r 相较于 CK 均有所提升, T₁、T₂、T₃ 处理较 CK 分别增加了 9.65%、21.95% 和 20.64%, 与轻度干旱胁迫相同, 重度干旱胁迫下各处理相互间均存在显著差异, 轻度干旱胁迫下 T₂ 处理 T_r 较 CK 提高了 29.41%, 重度干旱胁迫下 T₁ 处理较 CK 提高了 56.21% (图 5)。

2.4 油菜素内酯对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅脯氨酸含量的影响

高羊茅 Pro 含量随着干旱胁迫程度的加剧呈上升趋势, 在胁迫 30 d 时, 不同干旱胁迫程度下各处理高羊茅 Pro 含量较 CK 均有所提升; 胁迫至 60 d 时, 重度干旱胁迫下各处理 Pro 含量较 CK 有所上升, 但无显著差异 ($P > 0.05$), 与之相反正常水分和轻度干旱胁迫下各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。在胁迫 90 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫 T₂ 处理下高羊茅 Pro 含量升至最高, 分别较 CK 显著增加了 29.26% 和 10.33%; 重度干旱胁迫下, T₁、T₂、T₃ 处理较 CK

分别增加了 21.69%、11.00% 和 6.07%, 其中 T₁ 效果最好。且在正常水分和轻度干旱胁迫下 Pro 含量随时间呈先升后降的趋势 (图 6)。

2.5 油菜素内酯对干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅丙二醛含量的影响

随着干旱胁迫程度的加剧, 高羊茅 MDA 含量呈上升的趋势 (图 7)。在胁迫 30 d 时, 正常水分下各处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 轻度干旱胁迫和重度干旱胁迫下 T₁、T₂、T₃ 处理 MDA 含量较 CK 均显著下降 ($P < 0.05$); 胁迫至 60 d 时, 正常水分和重度干旱胁迫下 T₁ 处理高羊茅 MDA 较 CK 分别显著下降了 14.41% 和 10.22% ($P < 0.05$)。胁迫至 90 d 时, 正常水分和轻度干旱胁迫下与 CK 相比, T₂ 处理高羊茅 MDA 含量分别下降了 22.12% 和 18.22%; 重度干旱胁迫 T₁、T₂、T₃ 处理高羊茅 MDA 含量较 CK 分别下降了 15.18%、10.37% 和 4.69%, 其中 T₁ 处理效果最为明显 (图 7)。

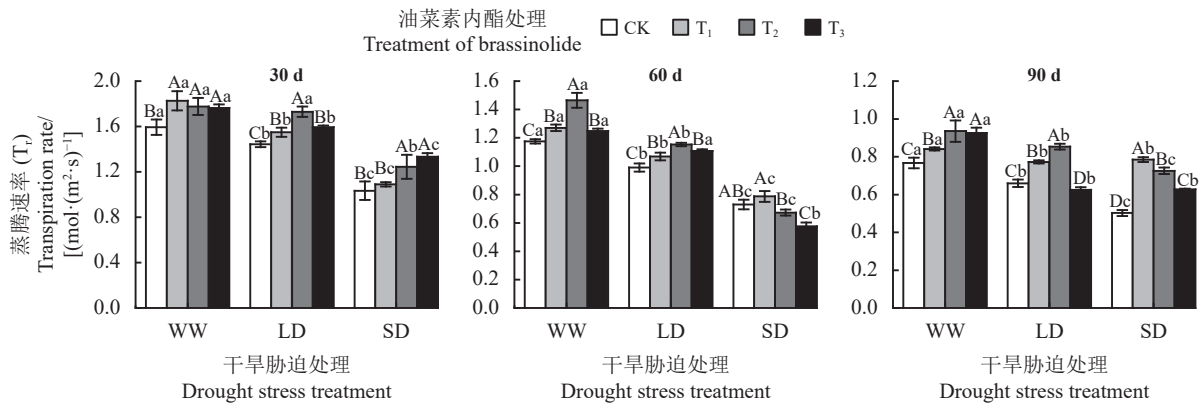


图 5 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅蒸腾速率的影响

Figure 5 Effect of brassinolide on the transpiration rate of *Festuca arundinacea* under different drought stresses

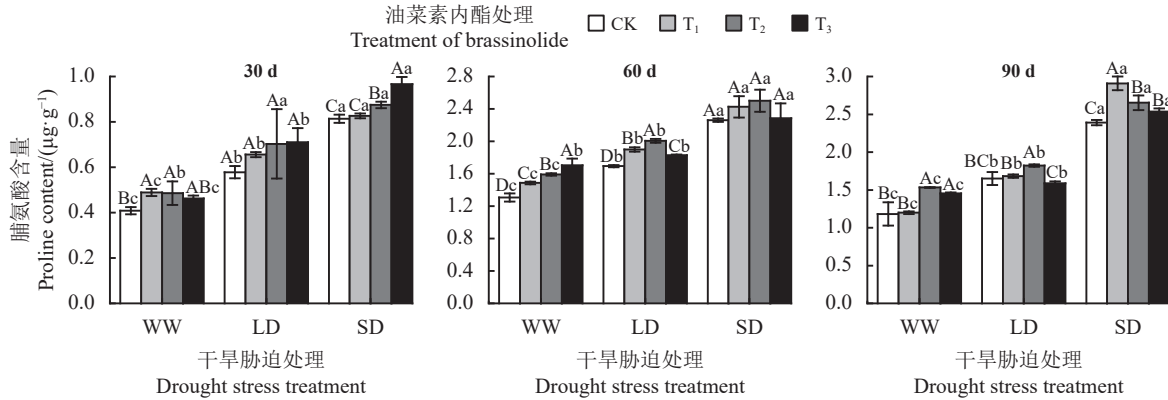


图 6 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅脯氨酸的影响

Figure 6 Effect of brassinolide on the Pro content in *Festuca arundinacea* under different drought stresses

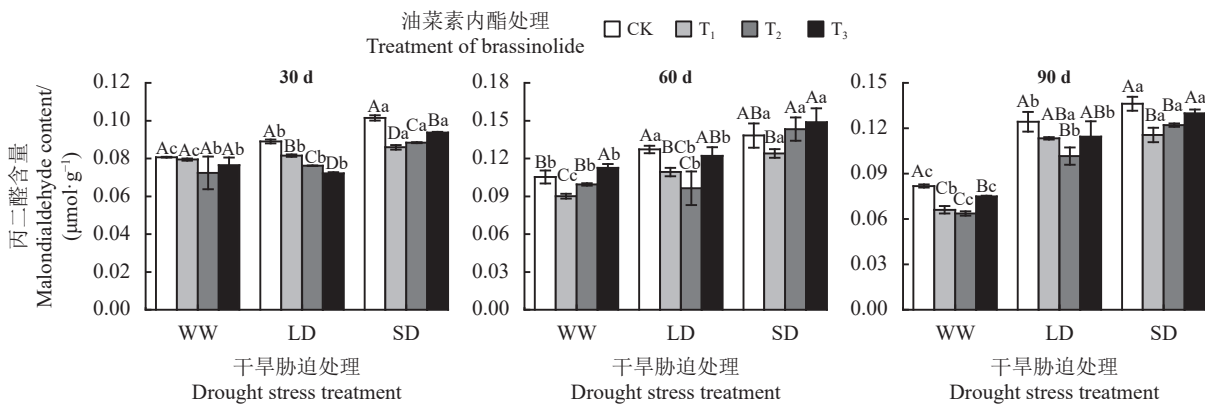


图 7 油菜素内酯对不同干旱胁迫下高羊茅丙二醛的影响

Figure 7 Effects of brassinolide on the MDA content in *Festuca arundinacea* under different drought stress

2.6 干旱胁迫下不同油菜素内酯对高羊茅生理效应的综合评价

2.6.1 相关性分析

将处理后高羊茅的 9 个生理指标进行相关性分析 (表 2)。结果表明, 高羊茅的 P_n 与 T_r 、 G_s 、 Bgb 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 C_i 、 Pro 、 MDA 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。

2.6.2 主成分分析

对不同处理方式下高羊茅 P_n 、 MDA 、 Pro 等 9 个生理指标进行主成分分析, 以特征值 > 1 为原则提取主成分, 共提取两个主成分 (表 3)。第 1 主成分特征值为 4.537, 方差贡献率为 50.411%, 决定第 1 主成分的指标主要是 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Bgb 、 MDA , 第 2 主成分特征值为 2.866, 方差贡献率为 31.843%, 决定第 2 主成分的指标主要是 T_r 、 H 、 Agb 、 Pro , 两个主成分的累计方差贡献率为 82.254%。

通过每个主成分得分与相应方差贡献率的乘积之和, 即 $F = F_1 \times 50.411\% + F_2 \times 31.843\%$ 计算出综

合得分 F , 综合得分越高高羊茅的抗旱性越强。

不同处理下高羊茅抗旱性能综合得分由高到低依次为 $A_3 > A_2 > A_4 > A_1 > B_3 > B_4 > B_2 > B_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_1$ (表 4)。在同一干旱胁迫下, $T_1 \sim T_3$ 各组处理的综合排名均大于 CK , 说明喷施 BR 能有效提高植被混凝土中高羊茅抗旱性; 此外在正常水分和轻度干旱胁迫下 T_2 处理抗旱性能优于其他处理, 与之不同的是在重度干旱胁迫下 T_1 处理高羊茅抗旱性能更佳。

3 讨论

株高和生物量能够直观反映植株的生长状况, 有研究表明极低浓度的 BR 即可显著促进植物的生长, 而较高浓度的 BR 则对植物生长及生长相关参数产生不利影响^[30], 在本研究中不同干旱条件下也表现出类似的情况, 正常水分和轻度干旱下 T_2 浓度效果较好, 而重度干旱下则是 T_1 有更好的表现。本研究中, 随着干旱胁迫程度的加剧, 高羊茅株高和地上、地下生物量显著下降, 通过喷施不同浓度

表 2 不同处理下高羊茅各项指标的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of each index of 90 d *Festuca arundinacea* under different treatments

指标 Index	P _n	T _r	G _s	C _i	H	Agb	Bgb	Pro	MDA
P _n	1								
T _r	0.902**	1							
G _s	0.263**	-0.006	1						
C _i	-0.836**	-0.761**	-0.324**	1					
H	-0.050	-0.307**	0.754**	-0.129	1				
Agb	0.049	-0.151	0.792**	-0.219*	0.864**	1			
Bgb	0.532**	0.310**	0.799**	-0.607**	0.671**	0.787**	1		
Pro	-0.805**	-0.790**	-0.122	0.475**	0.306**	0.166	-0.302**	1	
MDA	-0.709**	-0.668**	-0.467**	0.515**	-0.079	-0.217*	-0.519**	0.768**	1

*表示显著相关($P < 0.05$); **表示极显著相关($P < 0.01$)。P_n: 净光合速率; T_r: 蒸腾速率; G_s: 气孔导度; C_i: 胞间CO₂浓度; H: 株高; Agb: 地上生物量; Bgb: 地下生物量; Pro: 脯氨酸; MDA: 丙二醛。表3同。

* and ** indicates significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively. P_n: net photosynthetic rate, T_r: transpiration rate, G_s: stomatal conductance, C_i: intercellular CO₂ concentration, H: plant height, Agb: aboveground biomass, bgb: belowground biomass, Pro: proline, MDA: malondialdehyde. This is applicable for Table 3 as well.

表 3 主成分分析及方差解释
Table 3 Principal component analysis and variance interpretation

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2
P _n	0.838	-0.111
T _r	0.521	-0.779
G _s	0.810	0.470
C _i	-0.697	0.350
H	0.527	0.792
Agb	0.648	0.690
Bgb	0.901	0.259
Pro	-0.538	0.744
MDA	-0.789	0.424
特征根 Eigenvalues	4.537	2.866
方差贡献率 Proportion of variance/%	50.411	31.843
累计方差贡献率 Cumulative variance/%	50.344	82.254

BR 处理, 对其具有一定的缓解作用, 表明喷施 BR 对干旱胁迫下高羊茅有明显保护作用^[31], 此外 BR 处理下高羊茅株高、地上和地下生物量最高可较 CK 处理分别增加了 22.79%、45.37% 和 25.49%, 导致这种现象发生的原因可能是 BR 增强了植物生长过程中细胞的伸长与扩增, 加快植物茎和根的生长, 进一步

促进生物质积累提高植株生物量^[32-33]; 这与赵小强等^[21]在青贮玉米上的研究结果一致, 说明 BR 能有效促进植物茎和根的生长, 且具有明显的浓度效应。

植物的生长发育, 直接受到光合作用的影响^[16]; 而当其遭受干旱胁迫时, 会导致 P_n、G_s、T_r 降低^[9]。有研究表明, 气孔与非气孔限制均会导致 P_n 下降^[34], 若 C_i 和 G_s 同时下降, 说明导致 P_n 下降的主要原因是气孔限制因素; 若 G_s 下降, 而 C_i 维持不变或升高, 则说明导致 P_n 下降的主要原因是非气孔限制因素^[35]。本研究中, 在同一时间下随着干旱胁迫程度的加剧, 高羊茅的 P_n 呈下降趋势; 而高羊茅 G_s 下降的同时 C_i 上升, 表明在不同干旱条件下, 导致高羊茅 P_n 下降是由非气孔限制因素导致; 这可能是由于叶肉导度的降低导致叶肉细胞对 CO₂ 扩散阻力的增加, 进一步限制了高羊茅的光合作用^[36-38]。通过喷施不同浓度 BR 处理, 显著提高了高羊茅的 P_n、G_s、T_r, 降低了 C_i, 这与丁丹阳等^[19]在烟草上的研究结果一致, 说明适宜浓度的 BR 可以有利于扩大气孔开放, 改善植物内部水分利用效率, 缓解干旱胁迫的抑制作用, 增强高羊茅的光合作用, 提高植被混凝土中高羊茅的抗旱能力。

渗透调节是植物响应干旱胁迫生理机制的重要组成部分^[18], 而 Pro 是植物体内的重要渗透调节物, Pro 含量的提高可以避免膜结构被破坏, 维持细胞膜系统的稳定, 增强抗逆性^[39]; 本研究中, 随胁迫程

表4 不同处理方式下高羊茅抗旱性综合得分及排名

Table 4 Comprehensive scores and rankings of drought resistance of *Festuca arundinacea* under different treatments

干旱胁迫处理 Drought stress Treatment	油菜素内酯处理 Treatment of brassinolide	编号 Number	主成分得分 Principal component score		综合得分(F) Comprehensive score	综合得分排名 Comprehensive score ranking
			PC1 (F ₁)	PC2 (F ₂)		
WW	CK	A ₁	1.966 71	0.013 00	0.995 58	4
	T ₁	A ₂	3.331 75	-0.087 45	1.651 72	2
	T ₂	A ₃	4.313 63	0.149 44	2.222 13	1
	T ₃	A ₄	2.822 29	-0.172 39	1.367 85	3
LD	CK	B ₁	-1.183 49	0.024 11	-0.588 93	8
	T ₁	B ₂	-0.009 15	-0.353 69	-0.117 24	7
	T ₂	B ₃	1.188 19	0.053 13	0.615 90	5
	T ₃	B ₄	-0.278 15	0.659 36	0.069 74	6
SD	CK	C ₁	-3.886 00	0.084 24	-1.932 15	12
	T ₁	C ₂	-1.970 15	-0.110 95	-1.028 50	9
	T ₂	C ₃	-2.646 16	-0.280 45	-1.423 26	10
	T ₃	C ₄	-3.649 48	0.021 65	-1.832 85	11

度的增加, Pro 含量迅速增加, 这可能是干旱胁迫使渗透调节系统做出了应激反应, 加强了 Pro 的合成代谢, 增强高羊茅的渗透调节能力, 维持细胞正常的结构和功能^[40-41], 通过喷施不同浓度 BR 处理, 高羊茅中 Pro 含量有明显提升, 这可能是 BR 诱导干旱胁迫下 Pro 大量积累, 以应对干旱胁迫对高羊茅渗透调节系统所造成的危害^[42], 这与王雨婷等^[18]在葡萄上的研究结果一致, 说明 BR 能有效提高植株干旱胁迫下 Pro 含量, 增强其抗旱能力。但在胁迫 90 d 时, Pro 含量随 BR 浓度的增加呈先升后降的趋势, 表明 BR 具有一定的浓度效应。

MDA 是植物细胞膜氧化损伤的产物, 反映了植物受到逆境损害的程度^[43]; MDA 含量的增加会对植物光合结构造成氧化损伤破坏植物新陈代谢, 降低抗氧化酶活性, 从而对植物造成伤害^[16]。本研究表明, 在同一时间下随着干旱胁迫程度的加剧, 高羊茅的 MDA 含量呈上升趋势, 这可能是因为植物在遭受干旱胁迫后, 体内活性氧自由基不断增加,

从而导致 MDA 含量上升^[44], 通过喷施不同浓度 BR 处理后, 各时间段高羊茅 MDA 含量均有所下降; 这可能是 BR 作为抗氧化物质清除植物体内生成的 ROS, 减少自由基积累, 降低了细胞膜脂过氧化程度, 减少了 MDA 积累量^[45], 从而缓解干旱胁迫对高羊茅的氧化伤害, 这与在线旭林等^[46]在垂丝海棠 (*Malus halliana*) 上的研究结果相同。

4 结论

干旱胁迫下, 对植被混凝土中高羊茅施用不同浓度 BR 后, 能有效提高高羊茅株高和地上、地下生物量, 调节气孔导度, 促进高羊茅光合作用, 增加 Pro 含量, 减少 MDA 的累积, 从而提高植被混凝土中高羊茅植株的抗旱性, 缓解干旱胁迫对其造成的损害; 且具有浓度效应。在喷施 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 时, 适用于提高正常水分和轻度干旱胁迫下植被混凝土中高羊茅的耐旱性, 而在重度干旱胁迫下 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理效果更佳。

参考文献 References:

- [1] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1719-1724.
XIA Z Y, XU W N, WANG L H. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(6): 1719-1724.

- [2] 许文年. 水电工程扰动区植被生态修复技术研究. 北京: 科学出版社, 2017: 1-249.
XU W N. Research on Ecological Restoration Techniques for Vegetation in Areas Disturbed by Hydropower Projects. Beijing: Science Press, 2017: 1-249.
- [3] 刘黎明, 宋岩松, 钟斌, 房士栋, 许文年, 王一毅, 李明薇. 植被混凝土生态修复技术研究进展. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 916-927.
LIU L M, SONG Y S, ZHONG B, FANG S D, XU W N, WANG Y Y, LI M W. Research progress on ecological restoration technology of vegetation concrete. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 916-927.
- [4] 夏栋, 夏振尧, 赵自超, 李铭怡, 吴彬, 许文年. AB 菌生物有机肥对土壤生物特征和肥力的影响. *中国农学通报*, 2012, 28(23): 214-219.
XIA D, XIA Z Y, ZHAO Z C, LI M Y, WU B, XU W N. Effects of AB Biological-organic fertilizer on soil biological characteristics and fertility. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(23): 214-219.
- [5] 王立, 傅生杰, 马放, 李哲, 刘贵祥. 丛枝菌根真菌对植被混凝土植物早熟禾的影响. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(2): 44-48, 97.
WANG L, FU S J, MA F, LI Z, LIU G X. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on *Poa pratensis* in vegetation-growing concrete. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(2): 44-48, 97.
- [6] 刘大翔, 高贤, 许亚坤, 杨悦舒, 陈剑刚, 丁瑜, 夏栋, 肖海, 许文年. 施加生物炭对植被混凝土理化性质及狗牙根生物量的影响. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 1-14.
LIU D X, GAO X, XU Y K, YANG Y S, CHEN J G, DING Y, XIA D, XIAO H, XU W N. Influence of biochar addition amount on physicochemical properties of vegetation concrete and biomass of *Cynodon dactylon*. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 1-14.
- [7] 李双洋, 陈芳清, 熊丹伟. 外掺料对植被混凝土高羊茅根系生长及抗剪强度的作用. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1242-1248.
LI S Y, CHEN F Q, XIONG D W. Effect of external admixtures on the growth and shear strength of *Festuca arundinacea* roots in vegetation concrete. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(3): 1242-1248.
- [8] GASTAUER M, MASSANTE J C, RAMOS S J, DA SILVA R D S S, BOANARES D, GUEDES R S, CALDEIRA C F, MEDEIROS-SARMENTO P S, DE CASTRO A F, PRADO I G D O, CARDOSO A L D R, MAURITY C, RIBEIRO P G. Revegetation on tropical steep slopes after mining and infrastructure projects: Challenges and solutions. *Sustainability*, 2022, 14(24): 17003.
- [9] 王凯悦, 陈芳泉, 黄五星. 植物干旱胁迫响应机制研究进展. *中国农业科技导报*, 2019, 21(2): 19-25.
WANG K Y, CHEN F Q, HUANG W X. Research advance on drought stress response mechanism in plants. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(2): 19-25.
- [10] 魏鑫, 倪虹, 张会慧, 王晶英. 外源脱落酸和油菜素内酯对干旱胁迫下大豆幼苗抗旱性的影响. *中国油料作物学报*, 2016, 38(5): 605-610.
WEI X, NI H, ZHANG H H, WANG J Y. Effects of exogenous abscisic acid and brassinolide on drought resistance of soybean seedlings. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2016, 38(5): 605-610.
- [11] RADY M M, BORIEK S H K, EL-MAGEED T A A, EL-YAZAL M A S, ALI E F, HASSAN F A S, ABDELKHALIK A. Exogenous gibberellic acid or dilute bee honey boosts drought stress tolerance in *Vicia faba* by rebalancing osmoprotectants, antioxidants, nutrients, and phytohormones. *Plants-Basel*, 2021, 10(4): 748.
- [12] ZHANG J, CHENG K, LIU X Y, DAI Z C, ZHENG L L, WANG Y C. Exogenous abscisic acid and sodium nitroprusside regulate flavonoid biosynthesis and photosynthesis of *Nitraria tangutorum* Bobr in alkali stress. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: e1118984.
- [13] 陈晨, 陈虹, 倪铭, 张子晗, 喻方圆. 油菜素内酯调控植物生长发育的研究进展. *林业科学*, 2022, 58(7): 144-155.
CHEN C, CHEN H, NI M, ZHANG Z H, YU F Y. Research progress of Brassinolide in regulating plant growth and development. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(7): 144-155.
- [14] 李蒙, 东胜, 郭世荣, 杜静, 王军伟. 2,4-表油菜素内酯对樱桃番茄光合特性和果实品质的影响. *西北植物学报*, 2015, 35(1): 138-145.
LI M, SHU S, GUO S R, DU J, WANG J W. Effects of 2, 4-Brassinolide on photosynthetic characteristics and fruit quality of cherry tomato. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(1): 138-145.
- [15] NOLAN T M, VUKAŠINOVIĆ N, LIU D R, RUSSINOVA E, YIN Y H. Brassinosteroids: Multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses. *The Plant Cell*, 2020, 32(2): 295-318.
- [16] ANWAR A, BAI L Q, MIAO L, LIU Y M, LI S Z, YU X C, LI Y S. 2, 4-Epibrassinolide ameliorates endogenous hormone levels to

- enhance low-temperature stress tolerance in cucumber seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(9): 2497.
- [17] 龚祖运, 胡志辉, 汪艳杰. 外源 EBR 对涝渍干旱和盐胁迫下豇豆光合生理的影响. *北方园艺*, 2022(23): 9-20.
GONG Z Y, HU Z H, WANG Y J. Effects of exogenous EBR on photosynthetic physiology of cowpea under waterlogging, drought and salt stress. *Northern Horticulture*, 2022(23): 9-20.
- [18] 王雨婷, 王智真, 赵婷, 惠竹梅. 24-表油菜素内酯预处理对干旱胁迫下葡萄幼苗抗氧化系统和渗透调节物质的影响. *西北植物学报*, 2019, 39(3): 489-497.
WANG Y T, WANG Z Z, ZHAO T, HUI Z M. Effect of 24-Epibrassinolide pretreatment on the antioxidant system and osmotic substance in *Vitis vinifera* seedlings under drought stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(3): 489-497.
- [19] 丁丹阳, 张璐翔, 朱智威, 韩丹, 张艺洁, 鲁宇童, 许自成, 黄五星, 邵惠芳. 叶面喷施 2, 4-表油菜素内酯对烟草抗旱性的影响. *中国烟草科学*, 2018, 39(4): 50-57.
DING D Y, ZHANG L X, ZHU Z W, HAN D, ZHANG Y J, LU Y T, XU Z C, HUANG W X, SHAO H F. Effect of leaf spray 2, 4-Epibrassinolide on drought resistance of tobacco. *Chinese Tobacco Science*, 2018, 39(4): 50-57.
- [20] TONG H N, CHU C C. Brassinosteroid signaling and application in rice. *Journal of Genetics and Genomics*, 2012, 39(1): 3-9.
- [21] 赵小强, 任续伟, 张金乾, 钟源. 外源 2, 4-表油菜素内酯对干旱胁迫下青贮玉米幼苗生长和光合特性的影响. *分子植物育种*, 2023, 21(10): 3371-3382.
ZHAO X Q, REN X W, ZHANG J Q, ZHONG Y. Effects of exogenous EBR on growth and photosynthetic characteristics of silage maize seedlings under drought stress. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(10): 3371-3382.
- [22] WANG Q, DING T, GAO L P, PANG J, YANG N. Effect of brassinolide on chilling injury of green bell pepper in storage. *Scientia Horticulturae*, 2012, 144: 195-200.
- [23] CHEN Z F, WANG Z, YANG Y G, LI M, XU B C. Abscisic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. *Scientia Horticulturae*, 2018, 228: 1-9.
- [24] 姚春娟, 郭圣茂, 马英超, 赖晓莲, 杨肖华. 干旱胁迫对 4 种决明属植物光合作用和叶绿素荧光特性的影响. *草业科学*, 2017, 34(9): 1880-1888.
YAO C J, GUO S M, MA Y C, LAI X L, YANG X H. Effects of drought stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of four species of *Cassia*. *Pratacultural Science*, 2017, 34(9): 1880-1888.
- [25] SHENG M F, XIA H Q, DING H Z, PAN D Y, HE J P, LI Z Y, LIU J R. Long-Term soil drought limits starch accumulation by altering sucrose transport and starch synthesis in sweet potato tuberous root. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(3): 1-14.
- [26] 郭慧琴, 任卫波, 李平, 武自念, 万东莉. 2, 4-表油菜素内酯和赤霉素互作对羊草种子萌发及幼苗生长的影响. *草业科学*, 2014, 31(6): 1097-1103.
GUO H Q, REN W B, LI P, WU Z N, WAN D L. Effects of 2, 4-Epi-brassinolide and gibberellin on seed germination and seedling growth of *Leymus chinensis*. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1097-1103.
- [27] DOU L L, SUN Y R, LI S Y, GE C W, SHEN Q, LI H Z, WANG W B, MAO J Y, XIAO G H, PANG C Y. Transcriptomic analyses show that 2, 4-Epibrassinolide (EBR) promotes cold tolerance in cotton seedlings. *PLoS One*, 2021, 16(2): 1-21.
- [28] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进. *植物生理学通讯*, 1994(3): 207-210.
ZHAO S J, XU Z C, ZOU Q, MENG Q W. Improved of method for meurement of malondialdehyde in plant tissues. *Plant Physiology Journal*, 1994(3): 207-210.
- [29] 职明星, 李秀菊. 脯氨酸测定方法的改进. *河南科技学院学报 (自然科学版)*, 2005(4): 10-12.
ZHI M X, LI X J. Improvement of the method for measuring proline content. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2005(4): 10-12.
- [30] ANWAR A, LIU Y M, DONG R R, BAI L Q, YU X C, LI Y S. The physiological and molecular mechanism of brassinosteroid in response to stress: A review. *Biological Research*, 2018, 51(1): 46.
- [31] 赵红, 徐芬芬, 余淑铃, 郑怡婷, 符诗婷. 2, 4-表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗的缓解效应. *北方园艺*, 2022(20): 35-41.
ZHAO H, XU F F, YU S L, ZHENG Y T, FU S T. Mitigation effect of 2, 4-Epibrassinolide on cucumber seedlings under cadmium stress. *Northern Horticulture*, 2022(20): 35-41.
- [32] 闫慧萍, 彭云玲, 赵小强, 吕玉燕. 外源 2, 4-表油菜素内酯对逆境胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响. *核农学报*, 2016, 30(5): 988-996.

- YAN H P, PENG Y L, ZHAO X Q, LYU Y Y. Effect of exogenous 2, 4-Epibrassinolide on seed germination and seedling growth of maize under different stress. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(5): 988-996.
- [33] 黄斌, 李文科, 李梦露, 王娟娟, 孙敏涛, 闫妍, 王君, 贺超兴, 于贤昌, 李衍素. 2, 4-表油菜素内酯对低温下黄瓜种子萌发和幼苗低温抗性的影响. *中国蔬菜*, 2021(12): 59-66.
- HUANG B, LI W K, LI M L, WANG J J, SUN M T, YAN Y, WANG J, HE C X, YU X C, LI Y S. Effects of 2, 4-Epibrassinolide on seed germination under low temperature and cold stress tolerance of cucumber seedling. *China Vegetables*, 2021(12): 59-66.
- [34] 高冠龙, 冯起, 张小由, 司建华, 鱼腾飞. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 929-937.
- GAO G L, FENG Q, ZHANG X Y, SI J H, YU T F. An overview of stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of plants. *Arid Zone Research*, 2018, 35(4): 929-937.
- [35] MAFAKHERI A, SIOSEMARDEH A, BAHRAMNEJAD B, STRUIK P C, SOHRABI E. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(8): 580-585.
- [36] CHAVES M M, OLIVEIRA M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2365-2384.
- [37] 吴建慧, 许建军, 张静, 王玲. 两种委陵菜对干旱胁迫的光合生理响应. *草业科学*, 2014, 31(7): 1330-1335.
- WU J H, XU J J, ZHANG J, WANG L. Photosynthetic physiology responses of two *Potentilla* species under drought stress. *Pratacultural Science*, 2014, 31(7): 1330-1335.
- [38] MOUNKAILA H A K, 申孝军, 陈津赛, 王广帅, 高阳. 水盐胁迫下棉花叶片光合的气孔与非气孔限制. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 13-18.
- MOUNKAILA H A K, SHEN X J, CHEN J S, WANG G S, GAO Y. Reduction in photosynthesis of cotton seedling under water and salinity stresses is induced by both stomatal and non-stomatal limitations. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 13-18.
- [39] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 206-216.
- [40] 罗巧玉, 陈志, 马永贵, 王彦龙, 拉毛叶, 马玉寿. 水分胁迫下发草 (*Deschampsia caespitosa*) 叶片脯氨酸及其代谢产物变化. *生态学报*, 2022, 42(9): 3546-3556.
- LUO Q Y, CHEN Z, MA Y G, WANG Y L, Lamaoye, MA Y S. Analyses of proline accumulation and metabolites in the leaves of *Deschampsia caespitosa* under drought and waterlogging stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3546-3556.
- [41] MITTAL S, KUMARI N, SHARMA V. Differential response of salt stress on *Brassica juncea*: Photosynthetic performance, pigment, proline, D1 and antioxidant enzymes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 54: 17-26.
- [42] 刘亚洁, 安黎哲. 2, 4-表油菜素内酯对高山离子芥悬浮细胞抗寒性的影响. *生物学杂志*, 2020, 37(6): 64-67.
- LIU Y J, AN L Z. Effect of 2, 4-Epibrassinolide on chilling tolerance of *Chorispora bungeana* suspension cultured cells. *Journal of Biology*, 2020, 37(6): 64-67.
- [43] TANG S, ZHANG H X, LI L, LIU X, CHEN L, CHEN W Z, DING Y F. Exogenous spermidine enhances the photosynthetic and antioxidant capacity of rice under heat stress during early grain-filling period. *Functional Plant Biology*, 2018, 45(9): 911-921.
- [44] DU F, SHI H J, ZHANG X C, XU X X. Responses of reactive oxygen scavenging enzymes, proline and malondialdehyde to water deficits among six secondary successional seral species in loess plateau. *Public Library Science*, 2014, 9(6): e98872.
- [45] 王丽君, 李冬, 申洪涛, 王艳芳, 马宜林, 赵世民, 肖金胜, 刘领. 油菜素内酯对干旱胁迫下烤烟幼苗生长生理及光合特性的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(11): 33-41.
- WANG L J, LI D, SHEN H T, WANG Y F, MA Y L, ZHAO S M, XIAO J S, LIU L. Effects of brassinolide on growth, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings under drought stress. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 33-41.
- [46] 缙旭林, 张德, 张仲兴, 王双成, 高彦龙, 王廷秀. 2, 4-表油菜素内酯对干旱胁迫下垂丝海棠生理特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 37-45.
- XIAN X L, ZHANG D, ZHANG Z X, WANG S C, GAO Y L, WANG Y X. Effects of 2, 4-Epibrassinolide on physiological characteristics of *Malus halliana* under drought stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 37-45.

(责任编辑 苟燕妮)