

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.014

引用格式:郭佳雨,南丽丽,王利群,等.外源三十烷醇对干旱胁迫下红豆草生长和生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(1):142–153

GUO Jia-yu, NAN Li-li, WANG Li-qun, et al. Effects of Exogenous Triacontanol on the Growth and Physiological Characteristics of Sainfoin Under Drought Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):142–153

外源三十烷醇对干旱胁迫下红豆草生长和生理特性的影响

郭佳雨,南丽丽*,王利群,何蓉,任孟雨,马香香,田戈

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室,
甘肃兰州730070)

摘要:为探究外源三十烷醇(Triacontanol, TA)对干旱胁迫下红豆草(*Onobrychis viciifolia*)幼苗生长和生理特性的影响,以‘甘肃’红豆草(GS)、新品系P1及2049为材料,采用营养液砂培法,以–1.0 MPa聚乙二醇6000(T₁)模拟干旱胁迫,同时对红豆草叶面喷施0(CK),2.5(T₂),5.0(T₃),7.5(T₄),10.0(T₅)和12.5(T₆) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TA,测定21项形态与生理指标,筛选TA最佳缓解浓度。结果表明,不同浓度TA均能缓解红豆草干旱胁迫,其中10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TA(T₅)效果最佳。TA处理下各品种地上部株高、生物量及光合参数等指标较T₁提升19%~454%;根冠比、渗透调节物质及相关抗氧化酶活性降低15%~89%。此外,主成分分析表明气孔导度、叶绿素a和类胡萝卜素这3个指标为关键调控指标;对红豆草抗旱性进行综合评价,其排名为T₅>T₆>T₄>T₃>T₂>T₁;品种响应差异表现为GS>P1>2049。表明TA通过调节生理生化特性增强红豆草的抗旱性,其中10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T₅)处理最佳,本研究为合理利用TA解决红豆草栽培中的干旱问题提供了参考。

关键词:三十烷醇;红豆草;干旱胁迫;生理指标;光合参数

中图分类号:S541.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0142-12

Effects of Exogenous Triacontanol on the Growth and Physiological Characteristics of Sainfoin Under Drought Stress

GUO Jia-yu, NAN Li-li*, WANG Li-qun, HE Rong, REN Meng-yu, MA Xiang-xiang, TIAN Ge

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/ Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/ Key Laboratory of Forage Gerplasm Innovation and New Variety Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To investigate the effects of exogenous triacontanol (TA) on the growth and physiological characteristics of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) seedlings under drought stress, three materials (‘Gansu’ sainfoin, new line P1, and 2049) were subjected to –1.0 MPa polyethylene glycol 6000 (T₁) simulated drought stress using a nutrient solution sand culture method. Foliar sprays of TA at 0(CK), 2.5(T₂), 5.0(T₃), 7.5(T₄), 10.0 (T₅), and 12.5(T₆) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ were applied, and 21 morphological and physiological indicators were measured to identify the optimal TA concentration. Results demonstrated that all TA concentrations alleviated drought stress, with 10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TA (T₅) exhibiting the greatest efficacy. Under T₅ treatment, shoot height, biomass, and photosynthetic parameters increased by 19%-454% compared to T₁, while root-shoot ratio, osmoregulatory substances, and antioxidant enzyme activities decreased by 15%-89%. Principal component analysis identified stomatal conductance, chlorophyll a, and carotenoids as key regulatory indicators. Comprehensive drought resistance evaluation ranked treatments as T₅ > T₆ > T₄ > T₃ > T₂ > T₁, with varietal responsive-

收稿日期:2025-01-20;修回日期:2025-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32360339);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)资助

作者简介:郭佳雨(2001-),女,汉族,山西临汾人,硕士研究生,主要从事牧草栽培与育种研究,E-mail: 1872341681@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: nanli@gsau.edu.cn

ness ordered as $GS > P1 > 2049$. These findings indicated that TA enhanced sainfoin drought resistance by modulating physio-biochemical traits, with $10.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T_5) being the optimal treatment, providing a theoretical basis for TA application in drought management during sainfoin cultivation.

Key words: Triacontanol; Sainfoin; Drought Stress; Physiological indicators; Photosynthetic parameters

受全球升温影响,我国干旱地区面积持续扩大,导致农业经济遭受重大损失^[1]。特别是我国西北地区,年降水量较少,蒸发量较大,物种多样性较低,而人类的频繁活动,进一步加剧水土流失,造成环境的恶化^[2]。干旱会影响植物的形态结构、生理功能、细胞膜稳定性和抗氧化系统防御能力,严重制约植物的生长发育,其对农作物造成的损失在所有非生物胁迫中占首位^[3]。因此,提高作物抗旱性,加快耐旱作物的栽培以提高干旱、半干旱地区的作物种植面积和土地利用效率,是应对干旱地区水分缺失的重要策略之一^[4]。

红豆草(*Onobrychis viciifolia*)又名驴食豆,是一种多年生豆科牧草,具有抗旱、耐寒、适口性好等特点,常用于青贮、青干草及加工其他草产品等^[5-6];其根系发达,侧根丰富,其上附着根瘤菌,有生物固氮能力,可改善土壤肥力^[7]。红豆草地域分布较为广泛,多在我国干旱、半干旱地区种植,是发展畜牧业和改善生态的优良草种,亦是西北地区的乡土草种^[8]。研究表明干旱胁迫会使红豆草生长速度变慢,含水量降低,气孔关闭,从而降低光合效率,对红豆草品质和产量均产生一定影响^[9]。

三十烷醇(Triacontanol, TA)是一种天然存在的植物生长调节剂^[10],能调节植物体内还原糖、氨基酸、可溶性氮的水平,改善细胞渗透性,从而减轻逆境胁迫对植物的危害^[11]。研究表明TA在适宜浓度下能促进植株碳、氮代谢,提高植物对氮、磷、钾等元素的吸收,增强生理调控能力,促进植株生长发育,是一种对人畜无害、无副作用、对环境无污染的新型植物生长调节剂^[12]。1975年,在苜蓿试验中首次发现TA具有一定的生理活性,后来发现自然提取或人工合成的TA对玉米(*Zea mays*)^[13]、小麦(*Triticum aestivum*)^[14]等均有增产效应。目前,对红豆草的研究主要集中在抗性材料筛选、农艺性状评价等方面^[15-17],然而TA在提高红豆草逆境胁迫中的作用及缓解效应鲜见报道。本研究利用聚乙二醇-6000(Polyethylene Glycol 6000, PEG-6000)模拟干旱环境,分析不同浓度TA对干旱胁迫下红豆草生长及生理特性的影响,探明TA使用的最佳浓度,为合理利用TA解决红豆草栽培中的干旱胁迫问题提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以地方品种‘甘肃’红豆草(*O. viciaefolia* ‘Gansu’, GS)、新选育耐旱红豆草新品系P1和不耐旱材料2049为试验材料。其中品系P1是由‘1994’红豆草与‘甘肃’红豆草杂交选育而成,材料1994和2049由农业部全国畜牧兽医总站牧草种质资源搜集保护项目协作组从俄罗斯瓦维洛夫植物基因库引进。

1.2 试验方法

试验于2023年8月在甘肃农业大学植物生长室(每天光照14 h,光通量密度 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,昼夜温度分别为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度60%)进行,将消毒(121°C ,高温灭菌30 min)后的500 g细砂装入塑料杯(高138 mm,口径95 mm)中,经10%NaClO消毒的红豆草种子均匀撒播在塑料杯中并覆砂3~4 cm,出苗后间苗,每盆保留生长一致、分布均匀的幼苗15株,每隔2 d浇灌70 mL Hoagland 营养液。待其生长至10 cm左右时,以仅浇灌Hoagland 营养液的幼苗作为CK,浇灌含 -1.0 MPa PEG-6000的Hoagland 营养液作为干旱胁迫处理组,此浓度为本团队前期筛选的红豆草干旱胁迫敏感浓度^[18-19],再对其进行不同TA浓度的处理(表1)。TA以叶面喷施的方式于17:00喷施,每杯均匀喷施70 mL,CK和 T_1 处理喷施70 mL清水,每隔2 d喷施1次,胁迫9 d后采集红豆草幼苗进行相关指标的测定,每个处理重复3次。

表 1 试验处理

Table 1 Treatment of experiment	
处理 Treatment	成分 Composition
CK	正常营养液 Control
T_1	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$
T_2	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 2.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$
T_3	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 5.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$
T_4	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 7.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$
T_5	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 10.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$
T_6	$-1.0 \text{ MPa PEG} + 12.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{TA}$

TA在水溶液中溶解度极低,需借助有机溶剂才能将其溶解。本试验借助有机溶剂95%乙醇对其进行加热溶解,将TA溶解后加入平平加(Polyoxyethylene fatty alcohol ether, PEGMA)和十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, SDS),TA:PEGMA:SDS的比例为1:12:1,进行溶解。溶解TA的过程中均需要加热以防TA在低温下析出。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标 株高:每杯随机选取10株幼苗测量株高并取均值。

叶面积:采用LI-3000C叶面积仪测定,从植株顶端取第3片发育完全的叶片,重复10次。

生物量采用烘干法测定,将处理后植株的地上部和地下部进行分离,105℃杀青15 min,70℃烘至恒重,分别称取根系、叶茎干重。

根冠比=地下部干重/地上部干重

1.3.2 生理指标 生理指标参考邹琦^[20]的方法进行,其中采用饱和称重法测定叶片相对含水量(Leaf relative water content),氯化三苯基四氮唑(Triphenyltetrazolium chloride, TTC)法测定根系活力(Root activity),分光光度法测定叶绿素a(Chlorophyll a, Chl a)、叶绿素b(Chlorophyll b, Chl b)、叶绿素(Chlorophyll, Chl)和类胡萝卜素(Carotenoid, Car)含量,酸性茚三酮比色法测定脯氨酸(Proline, Pro)含量,硫代巴比妥酸法测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量,分光光度法测定过氧化氢(Hydrogen peroxide, H_2O_2)含量,高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性,愈创木酚法测定过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性,氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性,每个指标重复3次。

1.3.3 光合参数 使用便携式光合仪GFS-3000(Heinz-Walz, Effeltrich, Germany)测定光合参数。测定时,空气 CO_2 浓度为 $400 \mu mol \cdot mol^{-1}$,设定光合有效辐射强度为 $1200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,所测叶片选择完全展开、没有病虫害的成熟叶片。测量参数包括叶片净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)和胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)等光合气体交换参数,每个处理重复3次。

1.4 数据统计

利用Excel 2021进行数据整理,SPSS 26.0进行单因素ANOVA分析和Duncan's多重比较($P < 0.05$),用Origin 2022软件制图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下红豆草形态指标对TA的响应

由图1可知,干旱胁迫下,随TA浓度增加,除根冠比外,供试红豆草的株高、叶面积、地上和地下生物量均呈先升高后降低的趋势,在 T_5 时达到最大。与 T_1 相比, T_5 处理下的GS、P1和2049的株高、叶面积、地上、地下部的生物量均显著增加($P < 0.05$)。其中株高分别增加了24.95%、18.94%和26.92%;叶面积增加62.25%、78.67%和97.96%;地上生物量增加153.75%、96.08%和129.56%;地下生物量增加了160.95%、243.93%和155.86%,但均低于CK。然而,供试红豆草的根冠比显著降低($P < 0.05$),与CK相比, T_5 处理下GS、P1和2049的根冠比分别下降了68.06%、59.00%和64.88%。此外,相较于 T_1 , T_5 处理下的GS、P1和2049的株高、叶面积及生物量指标均显著提升($P < 0.05$),增幅依次为 $GS > P1 > 2049$,其中GS叶面积和地下生物量提升最显著。

2.2 干旱胁迫下红豆草生理指标对TA的响应

由表2可知,随TA浓度增加,红豆草幼苗叶片相对含水量和根系活力均呈先升高后降低的趋势,在 T_5 达到最高值。与 T_1 相比, T_5 处理下的GS、P1和2049的叶片相对含水量分别增加了52.05%、29.47%和24.21%,根系活力分别增加94.82%、199.45%和191.78%。但 T_5 处理下上述指标均低于CK,且 T_5 处理下2049的根系活力显著低于其他材料($P < 0.05$)。不同处理下红豆草的MDA、Pro和 H_2O_2 含量均显著高于CK($P < 0.05$),随TA浓度升高,MDA、Pro和 H_2O_2 含量先降低后升高,在 T_5 达到最小值。与 T_1 相比, T_5 处理下的GS、P1和2049的MDA含量分别减少了34.07%、34.81%和37.29%,Pro含量显著降低($P < 0.05$),分别减少57.21%、72.70%和39.69%, H_2O_2 含量则分别减少40.14%、23.00%和24.90%,其中GS的Pro降幅最大,表明GS对TA响应最敏感, T_5 处理可以有效缓解膜脂过氧化及氧化损伤。

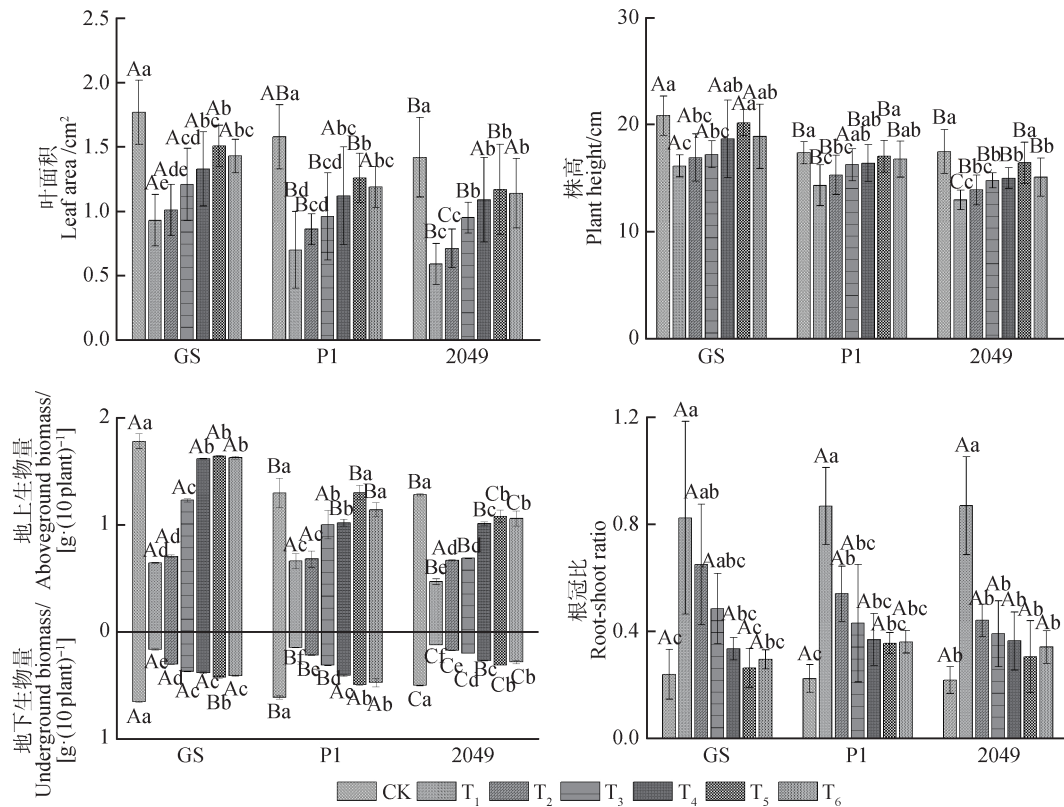


图1 干旱胁迫下喷施TA对红豆草形态指标的影响

Fig. 1 Effects of triacontanol spraying on morphological indexes of sainfoin under drought stress

注:GS,‘甘肃’红豆草;P1,耐旱红豆草新品系;2049,不耐旱红豆草材料;CK,正常营养液;T₁,干旱处理(−1.0 MPa PEG);T₂,TA处理组(−1.0 MPa PEG+2.5 μmol·L^{−1} TA);T₃,TA处理组(−1.0 MPa PEG+5 μmol·L^{−1} TA);T₄,TA处理组(−1.0 MPa PEG+7.5 μmol·L^{−1} TA);T₅,TA处理组(−1.0 MPa PEG+10 μmol·L^{−1} TA);T₆,TA处理组(−1.0 MPa PEG+12.5 μmol·L^{−1} TA)。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示材料间差异显著($P<0.05$)。下同

Note:GS, *O. viciaefolia* ‘Gansu’; p1, new strain of drought-tolerant sainfoin; 2049, Non-drought-tolerant sainfoin material; CK, normal nutrient solution; T₁, drought treatment (−1.0 MPa PEG); T₂, TA treatment group (−1.0 MPa PEG+2.5 μmol·L^{−1} TA); T₃, TA treatment group (−1.0 MPa PEG+5 μmol·L^{−1} TA); T₄, TA treatment group (−1.0 MPa PEG+7.5 μmol·L^{−1} TA); T₅, TA treatment group (−1.0 MPa PEG+10 μmol·L^{−1} TA); T₆, TA treatment group (−1.0 MPa PEG+12.5 μmol·L^{−1} TA). Different lowercase letters indicate significant differences between materials ($P<0.05$). Different capital letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below

2.3 干旱胁迫下红豆草抗氧化酶活性对TA的响应

干旱胁迫后,各处理下红豆草幼苗抗氧化酶活性较CK显著增加($P<0.05$),随着TA浓度的增加,供试材料叶片的POD,SOD和CAT活性呈先下降后上升趋势,在T₅时降到最小(表3)。与T₁相比,T₅处理下的GS,P1和2049的POD,CAT和SOD的活性均显著下降($P<0.05$)。其中POD活性分别下降了39.92%,32.91%和28.77%;CAT活性下降48.27%,50.95%和65.28%;SOD活性则分别下降81.36%,54.00%和89.02%。相较于T₁,T₅处理下的GS的POD,CAT及SOD活性降幅最大,其次为P1和2049,各指标响应强度为GS>P1>2049,表明T₅通过降低抗氧化酶活性减少活性氧累积,缓解氧化损伤。

2.4 干旱胁迫下喷施TA对红豆草叶绿素含量的影响

干旱胁迫下,随着TA浓度增加,各处理的Chl a,Chl b,Chl及Car含量均先上升后下降(图2),T₅时达最大值。与T₁相比,T₅处理下的Chl a含量分别上升了71.84%,32.21%和50.58%;Chl b含量上升19.40%,67.59%和22.92%;Chl含量显著上升($P<0.05$),分别上升49.50%,42.87%和40.76%;Car含量则上升32.34%,75.61%和58.41%。相较于T₁,T₅处理下的GS的Chl a和Car增幅最大,P1的Chl b及2049的Chl a次之,总Chl增幅依次为GS>P1>2049,差异显著($P<0.05$)。表明TA通过抑制叶绿素分解提升光合能力,且材料响应敏感性为GS>P1>2049,可能与生理特性差异相关。

表 2 干旱胁迫下喷施 TA 对红豆草生理指标的影响

Table 2 Effects of triacontanol spraying on physiological indexes of sainfoin under drought stress

材料 Material	处理 Treatment	叶片相对含水量 Leaf relative water content / %	根系活力 Root activity/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	丙二醛 Malondialdehyde/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	脯氨酸 Proline/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	过氧化氢 Hydrogen peroxide/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
GS	CK	$83.40\pm 2.34^{\text{Aa}}$	$696.85\pm 2.89^{\text{Aa}}$	$5.91\pm 0.22^{\text{Bd}}$	$602.80\pm 5.70^{\text{Ad}}$	$0.68\pm 0.04^{\text{Ad}}$
	T ₁	$49.08\pm 3.75^{\text{Ac}}$	$297.34\pm 8.81^{\text{Ac}}$	$12.72\pm 2.87^{\text{Aa}}$	$1543.48\pm 8.16^{\text{Ba}}$	$1.19\pm 0.05^{\text{Aa}}$
	T ₂	$64.52\pm 7.25^{\text{Ab}}$	$300.20\pm 4.87^{\text{Ac}}$	$11.85\pm 0.38^{\text{Aab}}$	$1476.90\pm 25.94^{\text{Bb}}$	$1.18\pm 0.06^{\text{Aa}}$
	T ₃	$64.90\pm 7.39^{\text{Ab}}$	$344.51\pm 7.54^{\text{Ad}}$	$10.43\pm 1.75^{\text{Aabc}}$	$1462.60\pm 31.15^{\text{Ab}}$	$1.03\pm 0.05^{\text{Ab}}$
	T ₄	$70.03\pm 9.39^{\text{Aab}}$	$406.73\pm 6.47^{\text{Bc}}$	$9.55\pm 2.13^{\text{Abc}}$	$909.69\pm 23.58^{\text{Bc}}$	$0.79\pm 0.02^{\text{Ac}}$
	T ₅	$74.62\pm 5.00^{\text{Aab}}$	$579.29\pm 5.13^{\text{Ab}}$	$8.39\pm 0.68^{\text{Acd}}$	$632.03\pm 11.61^{\text{Bd}}$	$0.71\pm 0.00^{\text{Ad}}$
P1	T ₆	$71.26\pm 6.20^{\text{Aab}}$	$417.06\pm 2.33^{\text{Bc}}$	$8.89\pm 2.61^{\text{Ac}}$	$864.22\pm 12.52^{\text{Bc}}$	$0.78\pm 0.01^{\text{Ac}}$
	CK	$79.67\pm 4.87^{\text{Aa}}$	$618.73\pm 1.75^{\text{Ba}}$	$8.69\pm 1.45^{\text{Ab}}$	$569.19\pm 13.91^{\text{Bf}}$	$0.52\pm 0.01^{\text{Cc}}$
	T ₁	$59.98\pm 10.83^{\text{Ab}}$	$177.87\pm 5.36^{\text{Bf}}$	$12.87\pm 2.98^{\text{Aa}}$	$1573.92\pm 24.68^{\text{Ba}}$	$0.79\pm 0.02^{\text{Ca}}$
	T ₂	$67.81\pm 3.26^{\text{Aab}}$	$311.10\pm 8.51^{\text{Ac}}$	$10.95\pm 1.95^{\text{Aab}}$	$1529.17\pm 20.35^{\text{ABb}}$	$0.69\pm 0.12^{\text{Bb}}$
	T ₃	$72.09\pm 7.26^{\text{Aab}}$	$341.53\pm 4.10^{\text{Ad}}$	$10.82\pm 1.16^{\text{Aab}}$	$1424.76\pm 12.69^{\text{Ac}}$	$0.61\pm 0.01^{\text{Cbc}}$
	T ₄	$76.20\pm 9.88^{\text{Aa}}$	$448.09\pm 7.21^{\text{Ac}}$	$10.38\pm 1.95^{\text{Aab}}$	$829.17\pm 21.83^{\text{Cd}}$	$0.60\pm 0.02^{\text{Cbc}}$
2049	T ₅	$77.65\pm 6.02^{\text{Aa}}$	$532.65\pm 5.91^{\text{Bb}}$	$8.39\pm 1.74^{\text{Ab}}$	$417.51\pm 2.61^{\text{Ce}}$	$0.53\pm 0.00^{\text{Cc}}$
	T ₆	$75.01\pm 7.38^{\text{Aa}}$	$468.43\pm 2.34^{\text{Ac}}$	$9.89\pm 2.06^{\text{Aab}}$	$740.42\pm 19.50^{\text{Ccd}}$	$0.56\pm 0.01^{\text{Cbc}}$
	CK	$71.05\pm 6.21^{\text{Ba}}$	$616.34\pm 4.74^{\text{Ba}}$	$7.89\pm 0.57^{\text{Ab}}$	$123.53\pm 10.02^{\text{Cc}}$	$0.58\pm 0.01^{\text{Bd}}$
	T ₁	$57.01\pm 9.04^{\text{Ab}}$	$151.81\pm 0.68^{\text{Cf}}$	$13.08\pm 5.77^{\text{Aa}}$	$2165.13\pm 16.47^{\text{Aa}}$	$1.01\pm 0.08^{\text{Ba}}$
	T ₂	$61.44\pm 2.09^{\text{Aab}}$	$173.88\pm 3.43^{\text{Bc}}$	$10.46\pm 1.80^{\text{Aab}}$	$1567.50\pm 40.01^{\text{Ab}}$	$0.78\pm 0.03^{\text{Bb}}$
	T ₃	$65.07\pm 2.55^{\text{Aab}}$	$200.51\pm 2.89^{\text{Bd}}$	$10.15\pm 0.47^{\text{Aab}}$	$1027.49\pm 20.96^{\text{Bc}}$	$0.69\pm 0.03^{\text{Bc}}$
	T ₄	$67.24\pm 7.08^{\text{Aab}}$	$227.89\pm 3.28^{\text{Cc}}$	$9.38\pm 3.36^{\text{Aab}}$	$963.12\pm 13.28^{\text{Ad}}$	$0.67\pm 0.02^{\text{Bc}}$
	T ₅	$70.81\pm 3.42^{\text{Aa}}$	$442.96\pm 5.13^{\text{Cb}}$	$8.20\pm 1.00^{\text{Ab}}$	$945.40\pm 13.54^{\text{Ad}}$	$0.59\pm 0.03^{\text{Bd}}$
	T ₆	$69.48\pm 6.40^{\text{Aab}}$	$402.72\pm 0.65^{\text{Cc}}$	$9.28\pm 2.57^{\text{Aab}}$	$956.94\pm 14.22^{\text{Ad}}$	$0.67\pm 0.04^{\text{Bc}}$

注: 同列不同小写字母表示处理间的差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示材料间的显著差异 ($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), and uppercase letters indicate significant differences between materials ($P<0.05$). The same as below

表 3 干旱胁迫下喷施 TA 对红豆草抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of triacontanol spraying on antioxidant enzyme activities of sainfoin under drought stress

材料 Material	处理 Treatment	过氧化物酶 Peroxidase/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
GS	CK	$16.21\pm 2.66^{\text{Ae}}$	$15.96\pm 0.86^{\text{Ad}}$	$0.27\pm 0.01^{\text{Ad}}$
	T ₁	$39.64\pm 0.73^{\text{Aa}}$	$42.01\pm 3.01^{\text{Aa}}$	$2.00\pm 0.02^{\text{Aa}}$
	T ₂	$28.45\pm 0.42^{\text{Bb}}$	$30.19\pm 0.79^{\text{Ab}}$	$1.70\pm 0.01^{\text{Ab}}$
	T ₃	$26.60\pm 1.90^{\text{Abc}}$	$27.18\pm 2.88^{\text{Ab}}$	$0.53\pm 0.16^{\text{Bc}}$
	T ₄	$24.17\pm 0.43^{\text{Acd}}$	$27.04\pm 3.61^{\text{Ab}}$	$0.46\pm 0.17^{\text{Bc}}$
	T ₅	$23.82\pm 1.25^{\text{Ad}}$	$21.73\pm 2.65^{\text{Ac}}$	$0.37\pm 0.05^{\text{Bcd}}$
P1	T ₆	$23.95\pm 2.26^{\text{Acd}}$	$22.39\pm 1.79^{\text{Ab}}$	$0.43\pm 0.06^{\text{Bc}}$
	CK	$16.08\pm 1.46^{\text{Ae}}$	$11.00\pm 4.72^{\text{Ab}}$	$0.26\pm 0.01^{\text{Ad}}$
	T ₁	$33.33\pm 1.52^{\text{Ba}}$	$24.13\pm 1.13^{\text{Ba}}$	$1.39\pm 0.17^{\text{Ba}}$
	T ₂	$27.98\pm 0.42^{\text{Bb}}$	$23.15\pm 2.28^{\text{Ba}}$	$1.39\pm 0.11^{\text{Ba}}$
	T ₃	$26.52\pm 1.10^{\text{Abc}}$	$21.66\pm 3.21^{\text{Ba}}$	$1.19\pm 0.05^{\text{Ab}}$
	T ₄	$25.47\pm 0.85^{\text{Acd}}$	$13.84\pm 3.28^{\text{Bb}}$	$1.09\pm 0.06^{\text{Ab}}$
2049	T ₅	$22.36\pm 0.42^{\text{Bd}}$	$11.84\pm 3.46^{\text{Bb}}$	$0.64\pm 0.08^{\text{Ac}}$
	T ₆	$23.31\pm 1.85^{\text{Acd}}$	$12.46\pm 3.03^{\text{Bb}}$	$0.94\pm 0.04^{\text{Ab}}$
	CK	$14.89\pm 1.12^{\text{Ac}}$	$4.38\pm 0.62^{\text{Bc}}$	$0.11\pm 0.01^{\text{Bc}}$
	T ₁	$30.98\pm 1.68^{\text{Ba}}$	$21.29\pm 2.69^{\text{Ba}}$	$1.09\pm 0.01^{\text{Ba}}$
	T ₂	$30.67\pm 1.66^{\text{Aa}}$	$15.77\pm 4.60^{\text{Cb}}$	$0.76\pm 0.01^{\text{Cb}}$
	T ₃	$24.56\pm 1.44^{\text{Ab}}$	$14.17\pm 0.69^{\text{Cb}}$	$0.13\pm 0.02^{\text{Cc}}$
	T ₄	$23.65\pm 1.48^{\text{Ab}}$	$13.78\pm 1.04^{\text{Bb}}$	$0.12\pm 0.03^{\text{Cc}}$
	T ₅	$22.06\pm 0.42^{\text{Bb}}$	$7.39\pm 0.96^{\text{Bc}}$	$0.12\pm 0.01^{\text{Cc}}$
	T ₆	$22.68\pm 2.38^{\text{Ab}}$	$8.60\pm 2.25^{\text{Bb}}$	$0.12\pm 0.04^{\text{Cc}}$

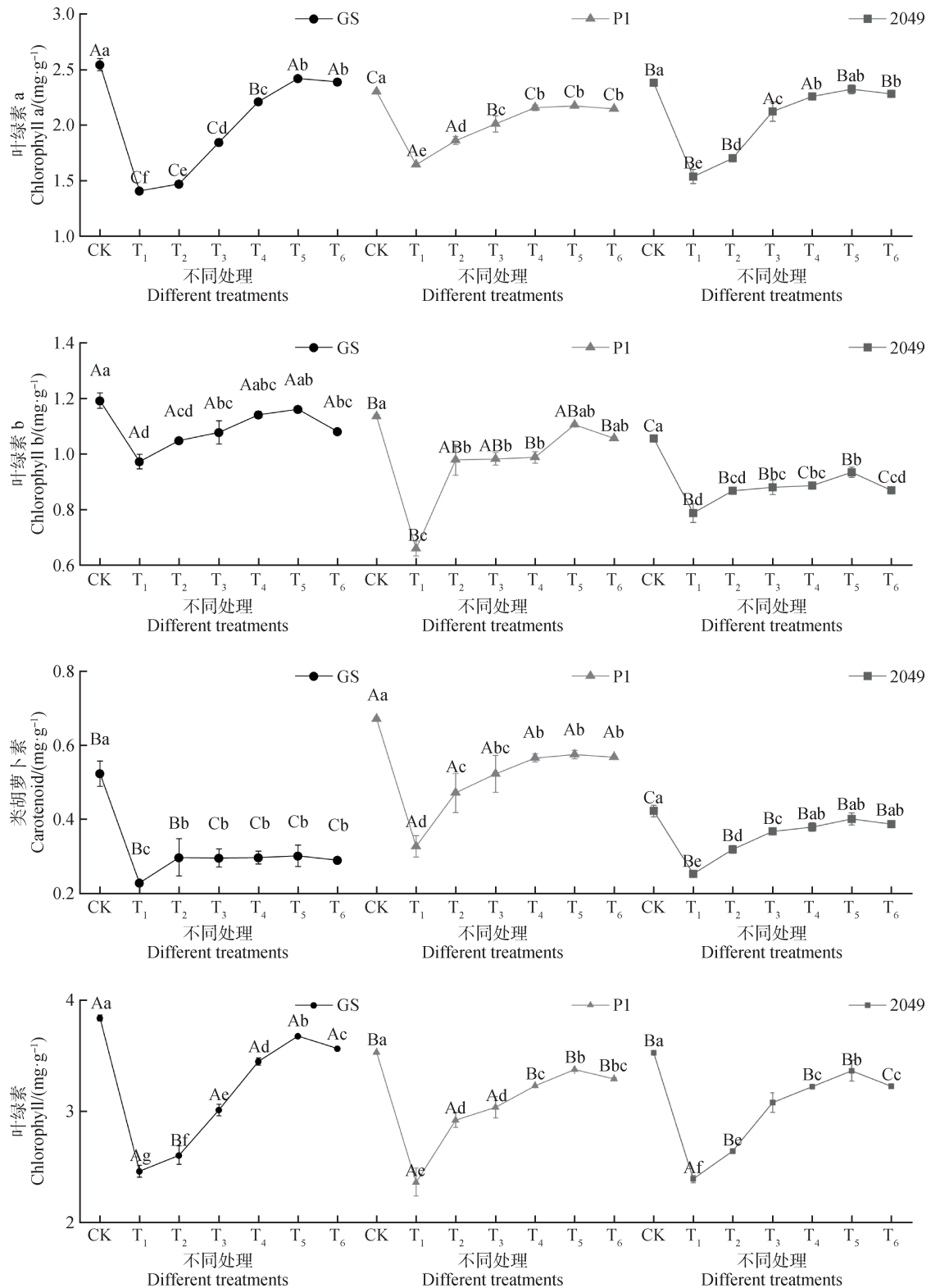


图 2 干旱胁迫下喷施 TA 对红豆草叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of triacontanol spraying on chlorophyll content of sainfoin under drought stress

2.5 干旱胁迫下喷施 TA 对红豆草光合参数的影响

由图 3 可知,干旱胁迫下,各处理的 T_r , P_n 和 G_s 随 TA 浓度增加均呈先上升后下降的趋势,在 T_5 处理达到最大值。与 T_1 相比, T_5 处理下的 G_s , P_1 和

2049 的 T_r , P_n 及 G_s 含量均显著升高 ($P < 0.05$)。其中 T_r 含量分别提高了 342.51%, 404.00% 和 450.67%; P_n 含量上升了 150.58%, 197.06% 和 233.07%; G_s 含量则分别上升了 111.78%,

190.20% 和 169.45%, 且均小于 CK。C_i 则随 TA 浓度的增加呈先下降后上升的趋势, 在 T₅ 时达到最小值, 与 T₁ 相比 T₅ 处理下分别降低了 15.36%,

22.59% 和 15.61%, 且大于 CK。此外相较于 T₁, T₅ 处理下 2049 的 Tr 和 Pn 增幅最大, 其次为 P1 及 GS; Gs 增幅依次为 P1>2049>GS。

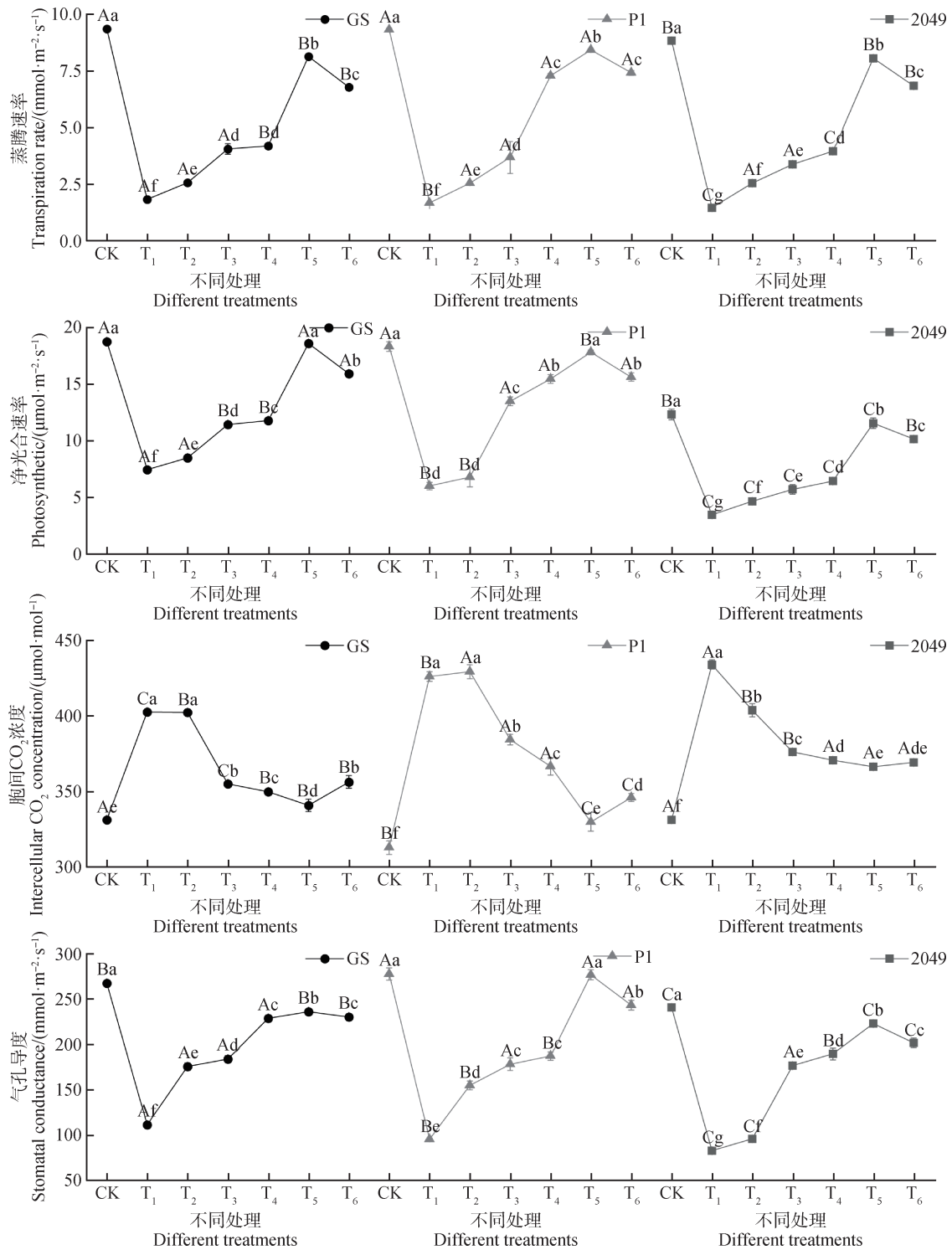


图3 干旱胁迫下喷施TA对红豆草光合特性的影响

Fig. 3 Effects of triacontanol spraying on photosynthetic characteristics of sainfoin under drought stress

2.6 不同TA浓度处理下红豆草抗旱性综合评价

利用21项指标进行隶属函数加权平均, 根据供试红豆草形态和生理指标, 对6种不同浓度TA处

理下红豆草的抗旱性进行综合评价(表4), 其由强到弱依次为: T₅(0.666)>T₆(0.656)>T₄(0.538)>T₃(0.429)>T₂(0.280)>T₁(0.105)。

表 4 干旱胁迫喷施不同 TA 浓度的红豆草抗旱性综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of drought resistance in sainfoin through foliar application of varied ta concentrations under drought stress conditions

材料 Material		隶属值/权 重赋值 F_{ij}/W_j	隶属值/权重赋值																			综合得分			
			A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	A_{17}	A_{18}	A_{19}	A_{20}	A_{21}	Comprehensive score	排名 Order
T ₁	GS	F_{ij}	0.404	0.289	0.134	0.076	0.069	0.000	0.586	0.000	0.067	0.047	0.259	0.260	0.148	0.000	0.267	0.050	0.304	0.000	1.000	1.000	1.000	0.105	6
		W_j	1.291	1.901	2.754	4.047	3.443	1.807	1.227	2.294	1.560	5.096	2.528	1.215	2.397	1.699	2.344	2.151	2.560	1.744	0.133	0.409	0.380		
	P1	F_{ij}	0.174	0.097	0.147	0.043	0.002	0.209	0.000	0.223	0.000	0.027	0.165	0.066	0.064	0.318	0.048	0.029	0.290	0.595	0.679	0.745	0.525		
		W_j	1.212	2.245	1.957	4.245	3.877	1.399	1.720	2.052	1.496	5.567	3.058	1.362	2.913	1.328	3.479	1.481	2.765	1.513	0.184	0.483	0.456		
	2049	F_{ij}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.114	0.239	0.057	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.231	0.000	0.000	0.000	0.264	0.516	0.650	0.449		
		W_j	1.349	2.406	2.719	4.128	3.986	1.550	1.341	1.669	1.476	6.033	3.559	1.310	2.912	1.246	4.060	1.658	17.527	1.729	0.103	0.481	0.206		
T ₂	GS	F_{ij}	0.503	0.360	0.181	0.339	0.336	0.055	0.729	0.156	0.165	0.140	0.329	0.262	0.475	0.450	0.272	0.172	0.337	0.009	0.838	0.548	0.686	0.280	5
		W_j	1.232	1.744	2.516	2.165	2.718	1.731	1.138	1.761	1.473	3.642	2.207	1.214	1.525	1.293	2.321	2.004	2.450	1.736	0.157	0.570	0.529		
	P1	F_{ij}	0.298	0.226	0.161	0.176	0.505	0.399	0.597	0.549	0.380	0.137	0.217	0.039	0.369	0.546	0.292	0.297	0.312	0.751	0.678	0.529	0.499		
		W_j	1.135	1.843	1.905	2.842	2.415	1.236	1.160	1.424	1.209	3.664	2.702	1.372	1.796	1.175	1.989	1.260	2.687	1.316	0.184	0.575	0.475		
	2049	F_{ij}	0.120	0.099	0.152	0.098	0.657	0.258	0.390	0.205	0.190	0.139	0.077	0.251	0.067	0.360	0.040	0.365	0.293	0.612	0.343	0.638	0.303		
		W_j	1.257	2.007	1.911	2.887	2.024	1.400	1.217	1.326	1.335	3.448	2.658	1.219	2.513	1.156	3.545	1.326	12.689	1.334	0.148	0.485	0.278		
T ₃	GS	F_{ij}	0.542	0.528	0.580	0.464	0.590	0.385	0.783	0.153	0.440	0.329	0.520	0.653	0.518	0.461	0.354	0.369	0.344	0.235	0.220	0.473	0.606	0.429	4
		W_j	1.210	1.459	1.448	1.774	2.027	1.379	1.107	1.769	1.274	2.307	1.642	1.071	1.456	1.285	2.023	1.765	2.426	1.515	0.505	0.609	0.587		
	P1	F_{ij}	0.419	0.313	0.407	0.359	0.673	0.512	0.570	0.665	0.456	0.281	0.655	0.410	0.489	0.670	0.348	0.315	0.363	0.873	0.572	0.470	0.459		
		W_j	1.068	1.647	1.293	1.954	1.925	1.157	1.178	1.284	1.164	2.528	1.360	1.228	1.559	1.105	1.812	1.245	2.503	1.161	0.215	0.607	0.508		
	2049	F_{ij}	0.231	0.305	0.168	0.149	0.734	0.628	0.414	0.315	0.485	0.243	0.146	0.478	0.481	0.466	0.089	0.409	0.557	0.746	0.009	0.391	0.260		
		W_j	1.183	1.493	1.854	2.493	1.793	1.123	1.199	1.150	1.146	2.612	2.163	1.136	1.366	1.092	3.074	1.286	8.318	1.183	0.869	0.606	0.309		
T ₄	GS	F_{ij}	0.726	0.628	0.876	0.492	0.820	0.707	0.903	0.155	0.736	0.345	0.543	0.695	0.750	0.610	0.468	0.493	0.615	0.593	0.186	0.375	0.602	0.538	3
		W_j	1.116	1.330	1.100	1.706	1.401	1.150	1.045	1.764	1.113	2.236	1.594	1.056	1.168	1.191	1.713	1.614	1.509	1.167	0.574	0.671	0.590		
	P1	F_{ij}	0.437	0.447	0.419	0.536	0.766	0.659	0.615	0.763	0.587	0.737	0.784	0.557	0.535	0.725	0.544	0.378	0.654	0.884	0.516	0.427	0.252		
		W_j	1.059	1.414	1.273	1.501	1.654	1.067	1.149	1.186	1.094	1.278	1.186	1.171	1.485	1.077	1.381	1.194	1.457	1.147	0.236	0.631	0.795		
	2049	F_{ij}	0.259	0.423	0.413	0.276	0.776	0.749	0.425	0.341	0.582	0.316	0.194	0.522	0.548	0.529	0.140	0.517	0.589	0.774	0.007	0.354	0.250		
		W_j	1.166	1.302	1.265	1.864	1.670	1.055	1.191	1.115	1.095	2.231	1.917	1.120	1.272	1.057	2.705	1.188	7.797	1.151	0.900	0.630	0.318		
T ₅	GS	F_{ij}	0.916	0.780	0.893	0.564	0.931	0.890	0.940	0.167	0.891	0.844	0.989	0.770	0.787	0.744	0.784	0.655	0.751	0.724	0.138	0.361	0.461	0.666	1
		W_j	1.033	1.172	1.085	1.551	1.100	1.052	1.028	1.734	1.044	1.152	1.009	1.028	1.132	1.118	1.203	1.418	1.048	1.039	0.714	0.681	0.734		
	P1	F_{ij}	0.519	0.566	0.633	0.701	0.788	0.675	0.837	0.781	0.685	0.882	0.937	0.860	0.995	0.832	0.699	0.654	0.856	0.990	0.280	0.302	0.198		
		W_j	1.019	1.256	0.998	1.234	1.590	1.058	1.026	1.169	1.047	1.105	1.029	1.054	1.004	1.026	1.162	0.966	0.734	1.013	0.401	0.719	0.929		
	2049	F_{ij}	0.443	0.489	0.466	0.354	0.866	0.797	0.578	0.391	0.679	0.835	0.528	0.559	0.720	0.633	0.534	0.680	0.597	0.905	0.004	0.290	0.080		
		W_j	1.063	1.215	1.184	1.613	1.400	1.029	1.091	1.054	1.049	1.096	1.068	1.106	1.081	1.003	1.391	1.040	7.653	1.002	0.942	0.675	0.592		
T ₆	GS	F_{ij}	0.916	0.780	0.893	0.564	0.931	0.890	0.940	0.167	0.891	0.844	0.989	0.770	0.787	0.744	0.784	0.655	0.751	0.724	0.138	0.361	0.461	0.656	2
		W_j	1.033	1.172	1.085	1.551	1.100	1.052	1.028	1.734	1.044	1.152	1.009	1.028	1.132	1.118	1.203	1.418	1.048	1.039	0.714	0.681	0.734		
	P1	F_{ij}	0.519	0.566	0.633	0.701	0.788	0.675	0.837	0.781	0.685	0.882	0.937	0.860	0.995	0.832	0.699	0.654	0.856	0.990	0.280	0.302	0.198		
		W_j	1.019	1.256	0.998	1.234	1.590	1.058	1.026	1.169	1.047	1.105	1.029	1.054	1.004	1.026	1.162	0.966	0.734	1.013	0.401	0.719	0.929		
	2049	F_{ij}	0.443	0.489	0.466	0.354	0.866	0.797	0.578	0.391	0.679	0.835	0.528	0.559	0.720	0.633	0.534	0.680	0.597	0.905	0.004	0.290	0.080		
		W_j	1.063	1.215	1.184	1.613	1.400	1.029	1.091	1.054	1.049	1.096	1.068	1.106	1.081	1.003	1.391	1.040	7.653	1.002	0.942	0.675	0.592		

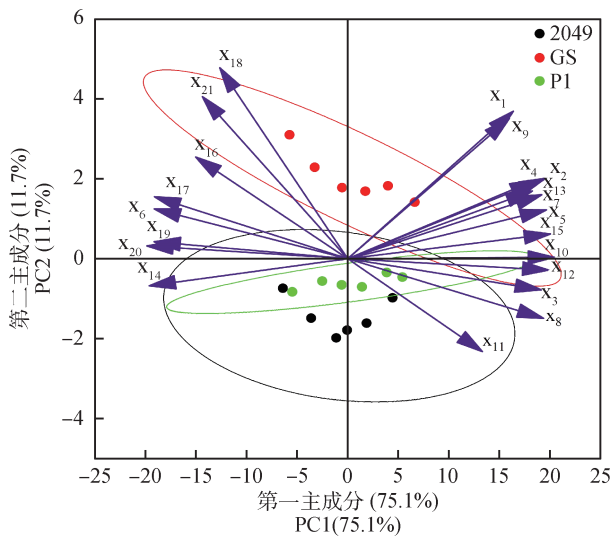


图 4 干旱胁迫下喷施 TA 相关指标的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of triacontanol spraying index under drought stress

表 5 各因子载荷矩阵和累计贡献率

Table 5 Factor loading matrix and cumulative contribution rate

指标 Index	主成分 Principal component		
	1	2	3
x ₁	0.762	0.609	-0.072
x ₂	0.928	0.313	-0.096
x ₃	0.874	0.338	-0.208
x ₄	0.928	0.194	0.213
x ₅	-0.913	0.183	0.171
x ₆	0.918	-0.111	0.231
x ₇	0.912	0.218	0.184
x ₈	-0.934	0.084	0.211
x ₉	-0.914	0.083	0.015
x ₁₀	-0.680	0.622	-0.211
x ₁₁	0.917	-0.213	-0.230
x ₁₂	0.760	0.553	0.069
x ₁₃	0.598	-0.357	0.687
x ₁₄	0.971	0.018	-0.157
x ₁₅	0.945	-0.076	0.090
x ₁₆	0.873	0.290	0.284
x ₁₇	-0.935	-0.106	0.064
x ₁₈	0.958	0.082	0.058
x ₁₉	-0.690	0.409	0.557
x ₂₀	-0.905	0.261	0.069
x ₂₁	-0.580	0.778	0.016
特征值 Eigenvalue	15.540	2.544	1.275
贡献率 Proportion/%	74.00	12.11	6.06
累积贡献率	74.00	86.11	92.18
Cumulative contribution rate/%			

注: x₁, 株高; x₂, 叶面积; x₃, 叶片相对含水量; x₄, 地上生物量; x₅, 地下生物量; x₆, 根冠比; x₇, 根系活力; x₈, 叶绿素 a; x₉, 叶绿素 b; x₁₀, 叶绿素含量; x₁₁, 胡萝卜素含量; x₁₂, 蒸腾速率; x₁₃, 净光合速率; x₁₄, 胞间 CO₂ 浓度; x₁₅, 叶片气孔导度; x₁₆, 超氧化物歧化酶; x₁₇, 过氧化物酶; x₁₈, 过氧化氢酶; x₁₉, 脯氨酸; x₂₀, 丙二醛; x₂₁, 过氧化氢

Note: x₁, plant height; x₂, leaf area; x₃, leaf water content; x₄, underground biomass; x₅, aboveground biomass; x₆, root-shoot ratio; x₇, root activity; x₈, chlorophyll a; x₉, chlorophyll b; x₁₀, chlorophyll; x₁₁, carotenoid; x₁₂, transpiration rate; x₁₃, photosynthetic rate; x₁₄, intercellular carbon dioxide concentration; x₁₅, stomatal conductance; x₁₆, superoxide dismutase; x₁₇, peroxidase; x₁₈, catalase; x₁₉, proline; x₂₀, malondialdehyde; x₂₁, hydrogen peroxide

3 讨论

3.1 TA 对干旱胁迫下红豆草形态指标的影响

研究表明,干旱胁迫不仅会引起植物个体大小的变化,还会导致其生物量的改变。其具体表现为叶面积减小、作物生长受抑制等现象^[21]。TA 作为生长调节剂具有促进植物生长、增加叶面积的作用^[22]。本研究发现, T₁ 处理下三种红豆草材料 GS, P1 和 2049 的株高、叶面积及生物量均显著低于 CK ($P < 0.05$), 其中 2049 的地上部生物量降幅最大, 表明其对干旱胁迫更为敏感。喷施 TA 后, T₅ 处理的 GS 植株表现出更明显的株高、叶面积及地上生物量增长, 说明 GS 可以通过优先分配营养从而实现生长补偿。根冠比则随 TA 浓度增加显著降低 ($P < 0.05$), 其中 GS 降幅最大, 这与 2049 的较高根冠比形成对比, 表现出不同材料通过进行不同的效应来响应 TA 对其的调控。该结果与李芳等^[23]研究得出的 TA 缓解生长抑制效应一致。GS 对 TA 的响应最强, 而 2049 则依靠维持根系稳态以适应干旱, 与姚宇恒^[24]对红豆草材料抗旱性的评价中发现干旱下 2049 的根系保持稳定的研究结果相一致。

3.2 TA 对干旱胁迫下红豆草生理指标的影响

MDA 是植物细胞膜脂质发生过氧化生成的一种主要氧化产物^[25]。干旱胁迫下, 植物体内会积累过量的 MDA, 导致膜系统受损, 进而引发氧化损伤^[26]。本研究发现, T₁ 处理下的 MDA 含量最高, 三种材料的 MDA 含量排序为 GS > P1 > 2049 ($P < 0.05$), 而喷施 TA 后, MDA 含量逐渐降低后上升, 在 T₅ 时下降到最低, 说明 TA 可以在一定程度上减缓干旱胁迫对植株的氧化损伤, 促进植物的生长发育, 这与熊海琳等^[27]研究结果一致。H₂O₂ 作为一种信号分子参与植物的生长发育调控^[28], 在干旱条件下, 植物体内的 H₂O₂ 含量会升高, 诱导了植物抗氧化系统的活化反应, 使细胞膜遭受损害, 加速了细胞衰老^[29-30]。本研究中, 随 TA 浓度升高, H₂O₂ 含量呈现先降低后升高的趋势, 在 T₅ 时最低, 且 GS 的 H₂O₂ 含量降幅达 40.14%, 显著高于 P1 和 2049, 说明 T₅ 处理能较好的缓解 H₂O₂ 对植物细胞膜的损伤, 从而促进植物抵抗干旱胁迫的能力。Pro 是一种渗透调节物质, 能保持植物细胞的正常代谢功能^[31], 在干旱胁迫下, Pro 不仅在细胞

质中起着渗透调节的作用^[32],且在稳定生物大分子结构等方面起着重要作用^[33]。本研究发现,在 T_1 处理下,Pro的含量最高,且GS的Pro含量较P1,2049分别高出18.34%和27.69%;随TA浓度升高,Pro含量逐渐减少后升高,在 T_5 时达到最低值,这可能是因为 T_5 处理下植物体内膨压较为稳定,细胞逐渐处于正常的渗透平衡,从而减少了渗透调节物质的产生。

为抵御胁迫,植物通常会形成一些能清除ROS的抗氧化酶类,如SOD,POD和CAT等^[34]。植物通过调节抗氧化酶的基因表达来增加酶的合成,从而提高其活性,有助于清除ROS,减少由于干旱胁迫所引起的氧化反应^[35]。本研究中发现,随着TA浓度升高,抗氧化酶活性呈先降低后升高的趋势,在 T_5 时降到最小,且材料2049的SOD活性降幅最大,而GS的POD和CAT活性下降最显著($P<0.05$)。说明在一定程度上,喷施TA可以减少植物体内ROS的积累,减少抗氧化酶的合成,而 T_5 处理相较于其余处理具有较好的缓解作用。

3.3 TA对干旱胁迫下红豆草叶绿素和光合作用的影响

叶绿素是光合作用中重要的光合色素,其含量在一定程度上可以反映植物同化物质的能力^[36]。干旱胁迫会影响植物叶片中的水分含量,从而影响叶绿体的合成,导致植物光合作用减弱^[37]。而植物叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量可以通过植物生长调节剂处理得到增强从而改善植物的生长状况^[38]。本研究中, T_5 处理下不同红豆草材料Chl a, Chl b, Chl含量最高,且三种材料的Chl a增幅排序为GS>2049>P1,其中GS的Car含量提升显著($P<0.05$),表明其在干旱胁迫下喷施TA后叶绿体膜的稳定性优于其他材料,高浓度的TA可以减缓干旱胁迫对红豆草叶绿素合成的影响,提高红豆草叶绿素的含量^[39]。此外,叶绿素合成和光合作用密切相关,光合作用是植物生长过程中最重要的生理过程之一,直接影响植物的生长及产量^[40]。干旱胁迫会使植物叶片萎蔫,造成气孔关闭从而导致植物光合能力降低^[41]。本研究发现,随着TA浓度的增加,供试红豆草的 T_n , P_n , G_s 均呈先上升后下降的趋势,在 T_5 时达到最高,说明TA缓解了干旱胁迫对红豆草幼苗的损伤,使植物可以正常进行光合作用。

4 结论

本试验通过对干旱胁迫下(-1.0 MPa)喷施2.5, 5, 7.5, 10和12.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TA的3种红豆草材料的形态和生理指标进行研究,通过隶属函数综合评价分析出喷施10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TA下的红豆草植物受到缓解效果最佳;主成分分析表明 G_s , Chl a和CAT这3个指标可以作为TA调控干旱胁迫下红豆草形态、生理和光合能力响应的关键指标;此外TA对三种供试材料的影响从大到小为GS>P1>2049,其中GS对TA的响应最为敏感。因此,三十烷醇可能是一种提高红豆草抗旱性的候选植物生长调节剂。

参考文献

- [1] 王劲松,姚玉璧,袁淑杰,等. 小麦干旱监测技术研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 273-285
WANG J S, YAO Y B, YUAN S J, et al. Research progress and prospects of wheat drought monitoring technology [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 273-285
- [2] 张文龙,时红,才硕,等. 水稻干旱时空演变规律及其补偿效应研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(12): 8-17
ZHANG W L, SHI H, CAI S, et al. Research progress on spatio-temporal evolution of rice drought and its compensation effect [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(12): 8-17
- [3] 岳凯,魏小红,刘文瑜,等. PEG胁迫下不同品系藜麦抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 52-59
YUE K, WEI X H, LIU W Y, et al. Evaluation of drought tolerance of various quinoa species under PEG stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 52-59
- [4] 陈壹铭,单立山,马静,等. 西北干旱区荒漠植物叶片和细根碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3648-3659
CHEN Y M, SHAN L S, MA J, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in leaves and fine roots of desert plants in arid region of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3648-3659
- [5] 付萍,张榕,耿小丽,等. 甘肃省二阴地区红豆草生产性能和营养品质评价[J]. 中国草食动物科学, 2020, 40(2): 78-80
FU P, ZHANG R, GENG X L, et al. Evaluation of production performance and nutritional quality of sainfoin in Eryin area of Gansu Province [J]. China Herbivore Science, 2020, 40(2): 78-80
- [6] 南丽丽,温素军,魏凡,等. 红豆草新品系的草产量及营养价值研究[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 383-388
NAN L L, WEN S J, WEI F, et al. Studies on the forage yield and nutritional value of new sainfoin lines [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 383-388
- [7] 马小兰,周华坤,张正芳,等. 外源IAA对干旱胁迫下红豆草

- 种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(3): 796-803
- MA X L, ZHOU H K, ZHANG Z F, et al. The effects of exogenous IAA on seed germination and seedling growth of *Onobrychis viciifolia* scop. under the drought stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(3): 796-803
- [8] 李陈建, 孙玉兰, 王玉祥, 等. 红豆草品种特异性、一致性和稳定性测试指南的研制[J]. 草业科学, 2024, 41(4): 957-966
- LI C J, SUN Y L, WANG Y X, et al. Development of distinctness, uniformity, and stability test guidelines for sainfoin[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 957-966
- [9] 姚宇恒, 南丽丽, 陈洁, 等. 红豆草幼苗叶片光合和叶绿素荧光对干旱胁迫的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(5): 1161-1174
- YAO Y H, NAN L L, CHEN J, et al. Effects of drought stress on the leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of sainfoin seedlings[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1161-1174
- [10] ISLAM S, MOHAMMAD F. Triacanthanol as a dynamic growth regulator for plants under diverse environmental conditions[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2020, 26(5): 871-883
- [11] PERVEEN S, SHAHBAZ M, ASHRAF M Y. Regulation in gas exchange and quantum yield of photosystem II (PS II) in salt-stressed and non-stressed wheat plants raised from seed treated with triacanthanol[J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 42: 3073-3081
- [12] 崔睿, 刘喆, 阙侃, 等. 三十烷醇的生理作用及研究进展[J]. 黑龙江科学, 2011, 2(6): 33-36
- CUI R, LIU Z, KAN K, et al. Research development of triacanthanol physiological effects[J]. Heilongjiang Science, 2011, 2(6): 33-36
- [13] 刘德盛, 张群, 陆东和. 我国三十烷醇研究进展及其在农业上的应用前景[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2): 91-94
- LIU D S, ZHANG Q, LU D H. Progress in the study of triacanthanol(TA) and the prospect of its application in agriculture[J]. Engineering Science, 2001, 3(2): 91-94
- [14] 张鑫, 王崇, 李丽, 等. 三十烷醇纳米制剂对冬小麦抗旱生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 142-151
- ZHANG X, WANG C, LI L, et al. Effects of TRIA-LDH on physiological characteristics of drought resistance in winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 142-151
- [15] 刘鑫, 汪堃, 梁鹏飞, 等. 红豆草苗期耐盐种质筛选及综合评价[J]. 西南农业学报, 2022, 35(9): 2171-2179
- LIU X, WANG K, LIANG P F, et al. Screening and comprehensive evaluation of salt tolerant germplasm of sainfoin at seedling stage[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(9): 2171-2179
- [16] 陈洁, 南丽丽, 汪堃, 等. 低磷胁迫对红豆草根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 61-69
- CHEN J, NAN L L, WANG K, et al. Effects of low phosphorus stress on root architecture of sainfoin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 61-69
- [17] 何海鹏, 南丽丽, 马彪, 等. 红豆草种质苗期耐寒性筛选及评价[J]. 中国草地学报, 2023, 45(5): 41-49
- HE H P, NAN L L, MA B, et al. Screening and evaluation of seedling stage cold tolerance in different sainfoin varieties[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(5): 41-49
- [18] YAO Y H, WANG K, NAN L L. Differences of morphological and physiological responses of sainfoin varieties/lines under simulated drought stresses[J]. Grassland Science, 2024, 70(4): 133-150
- [19] YAO Y H, NAN L L, WANG K, et al. Integrative leaf anatomy structure, physiology, and metabolome analyses revealed the response to drought stress in sainfoin at the seedling stage[J]. Phytochemical Analysis, 2024, 35(5): 1174-1185
- [20] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 18-20
- ZOU Q. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 18-20
- [21] 赵成凤, 王晨光, 李红杰, 等. 干旱及复水条件下外源褪黑素对玉米叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1431-1439
- ZHAO C F, WANG C G, LI H J, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis of maize leaves under drought stress and rewatering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1431-1439
- [22] 贾双杰, 李红伟, 江艳平, 等. 干旱胁迫对玉米叶片光合特性和穗发育特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 854-863
- JIA S J, LI H W, JIANG Y P, et al. Effects of drought on photosynthesis and ear development characteristics of maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 854-863
- [23] 李芳, 张珏锋, 钟海英, 等. 三十烷醇不同施用方式对茭白孕茭期、产量和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(12): 74-79
- LI F, ZHANG J F, ZHONG H Y, et al. Effects of different triacanthanol applying methods on stem swelling stage, yield and nutritional quality of *Zizania latifolia* [J]. China Vegetables, 2022(12): 74-79
- [24] 姚宇恒. 红豆草种质苗期抗旱性评价及代谢组学研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024: 10-16
- YAO Y H. Drought resistance evaluation and metabonomics study of sainfoin germplasm at seedling stage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024: 10-16
- [25] 汪月霞, 孙国荣, 王建波, 等. NaCl胁迫下星星草幼苗MDA含量与膜透性及叶绿素荧光参数之间的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 122-129
- WANG Y X, SUN G R, WANG J B, et al. Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 122-129
- [26] 孙文秀, 邵晨阳, 陈妍妍, 等. 干旱胁迫下2种内生真菌对烟草生理生化指标及NAC基因表达的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(1): 113-119

- SUN W X, SHAO C Y, CHEN Y Y, et al. Effects of two endophytic fungi on physiological and biochemical indexes and NAC gene expression in tobacco under drought stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(1):113-119
- [27] 熊海琳, 田小霞, 毛培春, 等. 褪黑素浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(5):23-32
- XIONG H L, TIAN X X, MAO P C, et al. Effects of melatonin soaking on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens* under drought stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(5):23-32
- [28] 周亚洁, 陈朋, 周鑫惠, 等. 不同品种小麦种子萌发及幼苗发育对外源过氧化氢处理的响应[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(16):5-11, 17
- ZHOU Y J, CHEN P, ZHOU X H, et al. Response of seed germination and seedling development of different wheat varieties to the treatment of exogenous H_2O_2 [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(16):5-11, 17
- [29] 熊丽丽, 闫霜, 李萍, 等. 葡萄糖-6-磷酸脱氢酶在紫花苜蓿干旱耐受性中的响应[J]. *草业学报*, 2018, 27(2):48-56
- XIONG L L, YAN S, LI P, et al. Role of glucose-6-phosphate dehydrogenase in the drought tolerance of alfalfa [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(2):48-56
- [30] 王彪, 宋世佳, 李东晓, 等. 褪黑素通过 H_2O_2 调控盐胁迫下小豆 Na^+/K^+ 平衡机制[J]. *华北农学报*, 2023, 38(6):62-71
- WANG B, SONG S J, LI D X, et al. The mechanism of melatonin regulating Na^+/K^+ balance by mediating H_2O_2 in adzuki bean under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(6):62-71
- [31] 施征, 史胜青, 姚洪军, 等. 植物线粒体中活性氧的产生及其抗氧化系统[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1):150-154
- SHI Z, SHI S Q, YAO H J, et al. Production of ROS and its antioxidant system in plant mitochondria[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(1):150-154
- [32] 韩蓓, 李晨, 庞园园, 等. 大豆谷胱甘肽还原酶基因的扩增及连作胁迫应答[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(3):60-67, 97
- HAN B, LI C, PANG Y Y, et al. Amplification of glutathione reductase gene and its response to continuous cropping stress in soybean[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3):60-67, 97
- [33] 户萌菲, 龙凤, 陈胜, 等. 碱胁迫下内生真菌共生对布顿大麦抗氧化酶和 ASA-GSH 循环的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(5):80-86
- HU M F, LONG F, CHEN S, et al. Effects of endophytic fungi on antioxidant enzyme activity and ASA-GSH circulation of *Hordeum bogdanii* under alkali stress[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(5):80-86
- [34] 郭迦南, 赵倚澎, 杨元植, 等. 超氧化物歧化酶在植物响应干旱、盐碱和冷害中的作用[J]. *植物研究*, 2024, 44(4):481-490
- GUO J N, ZHAO Y P, YANG Y Z, et al. Roles of superoxide dismutase in plant response to drought, salinity and cold stress [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2024, 44(4):481-490
- [35] 鲁克嵩, 闫磊, 侯佳玉, 等. 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜 Na^+/K^+ 平衡、生长及抗氧化系统的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5):141-148
- LU K S, YAN L, HOU J Y, et al. Effects of exogenous proline on Na^+/K^+ balance, growth and antioxidant system of rapeseed under salt stress[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(5):141-148
- [36] 孟颖超, 李伟, 孙瑶, 等. 外源 6-BA 对灌浆期谷子光合特性、抗氧化系统及产量的影响[J]. *核农学报*, 2024, 38(8):1605-1615
- MENG Y C, LI W, SUN Y, et al. Effects of exogenous 6-BA on photosynthesis, antioxidant system characteristics, and yield-related traits in foxtail millet at grain filling stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(8):1605-1615
- [37] 李小凡, 邵靖宜, 于维桢, 等. 高温干旱复合胁迫对夏玉米产量及光合特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(18):3516-3529
- LI X F, SHAO J Y, YU W Z, et al. Combined effects of high temperature and drought on yield and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(18):3516-3529
- [38] 裴志超, 周继华, 徐向东, 等. 干旱处理对不同玉米品种叶片光合速率和抗氧化特性及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2021(5):95-100
- PEI Z C, ZHOU J H, XU X D, et al. Effects of drought treatment on photosynthesis rate, antioxidant properties of leaves and yield of different maize varieties [J]. *Crops*, 2021(5):95-100
- [39] 刘晓晨, 王树凤, 寿松涛, 等. 复合型抗盐剂对 NaCl 胁迫下小麦种子萌发和生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2):199-209
- LIU X C, WANG S F, SHOU S T, et al. Effects of compound anti-salt agent on seed germination and growth of wheat under NaCl stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(2):199-209
- [40] 陈屏昭, 武卫华, 田虹, 等. 柑橘光合作用的过剩能量耗散机制及其生理意义[J]. *云南农业大学学报*, 2007, 22(5):681-687
- CHEN P Z, WU W H, TIAN H, et al. Dissipation mechanisms of the overmuch energy and their physiological significances of photosynthesis in *Citrus reticulata* blanco [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(5):681-687
- [41] GRIGOROVA B, VASEVA I, DEMIREVSKA K, et al. Combined drought and heat stress in wheat: changes in some heat shock proteins [J]. *Biologia Plantarum*, 2011, 55(1):105-111