



CO₂加富与不同光强对高羊茅幼苗生长的影响

朱智远 贾辰雁 丁孝伟 沈娇 张萌 张浩男 韩烈保

Effects of CO₂ enrichment and different light intensities on the growth of tall fescue seedlings

ZHU Zhiyuan, JIA Chenyan, DING Xiaowei, SHEN Jiao, ZHANG Meng, ZHANG Haonan, HAN Liebao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0469>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同氮处理和弱光下高羊茅生长及其碳氮代谢特征

Effects of different nitrogen treatments on the growth and carbon-nitrogen metabolism of tall fescue under low-light stress

草业科学. 2022, 39(1): 96 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0302>

两种乔木落叶浸提液对高羊茅幼苗生长和根际土壤酶活性的影响

Effects of two kinds of tree litter leaf extracts on the growth and rhizosphere soil enzyme activity of *Festuca arundinacea*

草业科学. 2024, 41(6): 1288 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0164>

CQ10-LPSp对紫花苜蓿幼苗抗氧化酶和防御酶的作用

Effects of CQ10-LPSp on antioxidative enzymes and defense enzymes of alfalfa seedlings

草业科学. 2023, 40(2): 460 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0715>

红蓝光光强对多年生黑麦草生长产量与品质的影响

Effects of red and blue light intensities on the growth, yield, and quality of perennial ryegrass

草业科学. 2023, 40(2): 502 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0487>

光照和水分对紫花苜蓿生长和水分利用的影响

Effects of light and water on alfalfa growth and water use

草业科学. 2023, 40(8): 2121 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0301>

践踏对5个植丝深度高羊茅草坪生理指标的影响

Effects of trampling on physiological indices of fescue turf at different filament planting depths in stitched hybrid turf

草业科学. 2024, 41(7): 1624 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0014>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0469

朱智远, 贾辰雁, 丁孝伟, 沈娇, 张萌, 张浩男, 韩烈保. CO₂ 加富与不同光强对高羊茅幼苗生长的影响. 草业科学, 2024, 41(11): 2564-2575.

ZHU Z Y, JIA C Y, DING X W, SHEN J, ZHANG M, ZHANG H N, HAN L B. Effects of CO₂ enrichment and different light intensities on the growth of tall fescue seedlings. Pratacultural Science, 2024, 41(11): 2564-2575.

CO₂ 加富与不同光强对高羊茅幼苗生长的影响

朱智远¹, 贾辰雁², 丁孝伟¹, 沈娇¹, 张萌¹, 张浩男¹, 韩烈保¹

(1. 北京林业大学草坪研究所, 北京 100083; 2. 内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 为探究 CO₂ 浓度与光照强度对高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 幼苗生长发育造成的影响, 以‘交战 2 号’作为试验对象, 以植物工厂中常见光气配比 [光强 300 μmol·(m²·s)⁻¹, CO₂ 浓度 400 μmol·mol⁻¹] 为对照, 设置不同 CO₂ 浓度 (大气浓度 400 μmol·mol⁻¹、加富浓度 1 000 μmol·mol⁻¹) 及不同光照强度 [低光强 150 μmol·(m²·s)⁻¹、中光强 300 μmol·(m²·s)⁻¹、高光强 450 μmol·(m²·s)⁻¹], 研究 CO₂ 加富与光照强度互作对高羊茅幼苗的生长、生理特性与草坪外观质量的影响。结果表明, CO₂ 加富会降低高羊茅的归一化指数 (NDVI) 和色泽, 导致草坪外观质量降低, 但 CO₂ 加富与中等光照强度处理显著提升了高羊茅的生长速率与部分抗氧化酶活性 ($P < 0.05$), 而且提升了高羊茅叶片中纤维素和木质素的含量, 更有利于根系形态与叶片形态建成。研究结果表明, 光照强度 300 μmol·(m²·s)⁻¹, CO₂ 浓度 1 000 μmol·mol⁻¹ 为较佳的光气配比, 可以为植物工厂培育高羊茅提供理论参数。

关键词: 光照强度; 理化性状; 根系性状; 叶片性状; 抗氧化酶活性

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)11-2564-12

Effects of CO₂ enrichment and different light intensities on the growth of tall fescue seedlings

ZHU Zhiyuan¹, JIA Chenyan², DING Xiaowei¹, SHEN Jiao¹, ZHANG Meng¹, ZHANG Haonan¹, HAN Liebao¹

(1. Turfgrass Research Institute, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia M-Grass Ecology and Environment (Group) Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China))

Abstract: In this study, to explore the effects of CO₂ concentration and light intensity on the growth and development of tall fescue (*Festuca arundinacea*) seedlings, we used “Jiaozhan 2” as the experimental object and the phosgene ratio [light intensity of 300 μmol·(m²·s)⁻¹ and CO₂ concentration of 400 μmol·mol⁻¹] commonly used in plant factories as the control treatment. Various CO₂ concentrations (atmospheric and enrichment concentrations of 400 and 1 000 μmol·mol⁻¹, respectively) and light intensities [low, medium, and high light intensities of 150, 300, and 450 μmol·(m²·s)⁻¹, respectively] were implemented to investigate the effects of CO₂ enrichment and light intensity on the growth, physiological characteristics, and appearance quality of tall fescue seedlings. The results indicated that CO₂ enrichment reduced the NDVI and color of tall fescue, resulting in lower appearance quality of turf. However, the treatment of CO₂ enrichment with medium light intensity significantly increased the growth rate of tall fescue and some antioxidant enzyme activities ($P < 0.05$). It also increased the contents of cellulose and lignin in tall fescue leaves and was more conducive to root and leaf morphology development. The optimal phosgene ratio was determined, comprising a light intensity of 300 μmol·(m²·s)⁻¹ and CO₂ concentration of 1 000 μmol·mol⁻¹, which could provide theoretical parameters for the cultivation of tall fescue in plant factories.

收稿日期: 2023-09-02 接受日期: 2023-12-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31971770)

第一作者: 朱智远 (2000-), 男, 安徽芜湖人, 在读硕士生, 主要从事草坪科学与管理研究。E-mail: snhmwy@163.com

通信作者: 韩烈保 (1965-), 男, 湖北钟祥人, 教授, 博士, 主要从事草坪科学与管理研究。E-mail: hanliebao@163.com

Keywords: light intensity; physicochemical properties; root characteristics; leaf traits; antioxidant enzyme activity

Corresponding author: HAN Liebao E-mail: hanliebao@163.com

CO₂ 和光照是植物生长发育中必不可少的原料和能量来源,影响着植物的光合作用。CO₂ 作为光合作用的底物、初级代谢过程的参与者以及生长调节者,参与了植物体内多种生化反应,直接影响植物的生长状况。有大量研究表明,在不超过植物 CO₂ 浓度饱和点的范围内提升 CO₂ 浓度可以增强植物的光合作用效率,改善其生长水平,提升植物抗逆境胁迫的能力^[1-3]。

光是植物进行光合作用的最重要的因素,影响植物的质体分化、叶绿素合成等植物生命活动中的关键步骤。光可以调节植物的气孔开度,影响植物叶片吸收外界 CO₂,对植物的生长发育有着至关重要的作用^[4]。目前,光对植物生长影响的研究主要集中在光强、光质和光周期上。其中,光照度即光合量子通量密度是影响植物光合作用的重要参数之一。近年来,大量学者对光照强度进行了诸多研究,发现适宜的光照强度可以改善植物的形态,促进植物的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白的合成,有利于植物的生长发育^[5-8]。但是目前针对光强对于运动场草坪草的相关研究并不多,且不同草坪草在相同光强下会表现不同的生物学特征,同一植物的不同品种之间也会存在差异^[9]。

随着我国人口增长,可用耕地不断减少,利用植物工厂来进行农业生产已成为高效农业生产方式之一^[10]。植物工厂内的温湿度、光照、CO₂ 浓度以及养分都是影响植物生长的重要环境因素。但是利用植物工厂进行农业生产的植物种类繁多,而不同的植物对于光照强度和 CO₂ 浓度的需求也不一样^[11]。因此,国内外大部分研究都是针对 CO₂ 浓度或者光照强度对植物生长的单因素影响^[12-17],鲜有探究两者耦合作用的研究。高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 因其耐践踏性与抗病能力强,被广泛运用于足球场、高尔夫球场等运动场场地中,所以使用植物工厂对该草种进行农业生产对我国的运动场场地发展具有重要意义。因此,将 CO₂ 与光照强度相结合,探究两者耦合作用下高羊茅幼苗期到成坪期间坪观质量、生长指标及生理特性的响应特征,为未来植物工厂生产高羊茅提供理论依据与技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2023 年 3 月在北京林业大学林学院实验室内开展,试验材料为高羊茅,品种为‘交战 2 号’。

1.2 植株培养

选择颗粒饱满、直径相似的高羊茅种子,以 40 g·m⁻² 均匀播种在圆形花盆内。花盆高 20 cm,内直径 20 cm,外直径 21.5 cm,底直径 18 cm。种植基质为纯沙,播种前按照 30 g·m⁻² 的量施入氮磷钾复合肥料 (N:P:K = 18:5:18) 作为基肥。将供试草种种植于培养室内,培养室内温度 (23±2) °C,相对湿度 50%±10%。在培养架上遮盖反光纸防止除 LED 灯以外其他光源影响试验结果。保持 LED 灯每天 10 h 连续光照。自播种完成后开始光照处理,待种子出苗后将各个盆栽移入 CO₂ 培养箱 (JIUPU,福建九蒲)。培养箱分为 3 层,每层均可以控制不同光照强度,且培养箱中设有一套 CO₂ 浓度控制系统,可以监测培养箱内 CO₂ 浓度。培养箱外接液态 CO₂ 钢瓶,当培养箱内 CO₂ 浓度低于设置值时,电磁阀自动打开补充 CO₂,使培养箱内 CO₂ 浓度达到设定值。CO₂ 培养箱内温度 (23±1) °C,相对湿度 50%±10%,每天连续补光 10 h,植株材料在 CO₂ 培养箱中培养 1 个月。培养期间,每周给植株材料浇水 3 次,每次浇水浇到底部托盘渗出水为止,保证植株获得充足的水分。每 5 d 按照“三分之一”修剪原则对植株进行一次修剪。

1.3 试验方案

试验采取裂区设计 (表 1),主区因素是 CO₂ 处理,分为大气 CO₂ 浓度 C₁ (≈400 μmol·mol⁻¹) 和加富 CO₂ 浓度 C₂ (≈1 000 μmol·mol⁻¹) 两个水平。裂区因素为不同的光照强度 (光合有效辐射) 处理,分为低光照强度 L₁ [150 μmol·(m²·s)⁻¹]、中光照强度 L₂ [300 μmol·(m²·s)⁻¹] 和强光照强度 L₃ [450 μmol·(m²·s)⁻¹] 3 个水平,光周期为 10 h·d⁻¹,每个处理 4 个重复。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 草坪生理指标的测定

试验结束后修剪草坪并收集草屑,使用 95% 的

表 1 CO₂ 加富与不同光强对高羊茅幼苗
生长发育的试验处理

Table 1 Details of treatments, comprising CO₂ enrichment
and different light intensities, applied to tall fescue seedlings

处理 Treatment	CO ₂ 浓度 Concentration of CO ₂ /(μmol·mol ⁻¹)	光照强度 Light intensity/ [μmol·(m ² ·s) ⁻¹]
C ₁ L ₁	400	150
C ₁ L ₂		300
C ₁ L ₃		450
C ₂ L ₁	1 000	150
C ₂ L ₂		300
C ₂ L ₃		450

乙醇提取法测定叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量;超氧化物歧化酶(SOD)活性用 NBT 法测定、过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚法测定、过氧化氢酶(CAT)活性用紫外吸收法测定^[18]。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性按照 Nakamo 和 Asada 方法测定^[19],以 290 nm 处的吸光值作为抗坏血酸(ASA)的消耗量[消光系数 2.8 mmol·(L·cm)⁻¹];利用蒽酮试剂与糠醛类化合物反应生成蓝绿色物质,测定该蓝绿色物质在 620 nm 处的吸光值得到纤维素含量^[20];采用乙酰化法使木质素中的酚羟基发生乙酰化,测定 280 nm 处的吸光值得到木质素含量^[21]。

1.4.2 草坪生长指标的测定

从植株材料移入 CO₂ 培养箱中开始,期间每隔 5 d 对草坪进行一次修剪,每 10 d 用直尺测量各个小区内的草坪高度,每个处理测量 10 次取平均值,并换算出草坪草的生长速率。

试验结束后将环刀取样的样品地上部分与地下部分分离后,将地下部分放入扫根盘中,用镊子分开,用根系扫描仪(Epson Scan V850,爱普生)对样品的地下部分进行扫描,获取的扫描图像用根系分析软件 Win-RHIZO PRO 2013 (Regent Instruments Inc., Canada)分析根长、根表面积、根体积;使用叶面积仪(YAXIN-1241,北京雅欣)测量地上部分叶片的叶长、叶宽、叶面积。最后将土钻取样的样品放入 105 ℃ 的烘箱内 2 h 杀青,随后放入 85 ℃ 的烘箱内 48 h 烘至恒重,测量地上部分与地下部分的生物量。

1.4.3 草坪坪观质量的测定

试验结束后使用 TCM500 草坪色彩分析仪器

(SperctrumTM, 北京易科泰)分析高羊茅的归一化指数(NDVI)和色泽^[22];采用环刀法测量高羊茅的密度;采用草坪外观质量评分标准(NTEP)九分制评分法测量均一性^[23]。

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 365 对数据进行处理,绘图使用 Origin 2022 软件完成。使用 SPSS 26 软件对试验数据进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 加富与 LED 光强对幼苗高羊茅的生理指标的影响

2.1.1 光合色素

叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均呈现出随光照强度增大而增大的趋势(表 2)。但是光照强度的增加对叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量并没有显著影响($P > 0.05$)。在相同光照强度下,CO₂ 加富下所有处理相较于大气 CO₂ 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均显著降低($P < 0.05$)。其中 C₂L₃ 相较于 C₁L₃ 的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别显著下降了 41.7%、34.7% 和 39.5% ($P < 0.05$)。

2.1.2 抗氧化酶活性

随着光照强度的增大,CAT、POD 和 APX 活性都有不同程度的增加(图 1)。其中,光照强度对 CAT 活性和 POD 活性具有显著影响($P < 0.05$)。C₁L₃ 相较于 C₁L₁ 和 C₁L₂ 的 CAT 与 POD 活性显著提升。在相同光照强度下,CO₂ 加富相较于大气 CO₂ 浓度处理 CAT 和 POD 活性显著提升。光照强度对 SOD 活性没有显著影响($P > 0.05$),但 CO₂ 加富下所有处理的 SOD 活性相较于大气 CO₂ 浓度下的处理都有显著提升($P < 0.05$)。CO₂ 浓度与光照强度对 APX 酶活性没有显著影响($P > 0.05$)。

2.1.3 纤维素与木质素含量

高羊茅的纤维素含量和木质素含量都呈现出随着光照强度的增加而增加的趋势(图 2),大气 CO₂ 浓度下,C₁L₃ 的纤维素含量和木质素含量均显著高于 C₁L₁ 与 C₁L₂ ($P < 0.05$)。CO₂ 浓度加富则进一步放大了该趋势,在相同的光照强度下,CO₂ 浓度加富下所有处理的纤维素含量和木质素含量均比大气 CO₂ 浓度下的各处理要高,其中 C₂L₃ 的纤维素含量和木质素含量显著高于其他处理。

表 2 CO₂ 加富与不同光强处理下对幼苗高羊茅光 and 色素的影响

Table 2 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on pigment characteristics of tall fescue seedlings

处理 Treatment	叶绿素a Chlorophyll a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素b Chlorophyll b/(mg·g ⁻¹)	总叶绿素 Total Chlorophyll/(mg·g ⁻¹)
C ₁ L ₁	0.99 ± 0.05a	0.47 ± 0.02a	1.46 ± 0.06a
C ₁ L ₂	1.04 ± 0.02a	0.48 ± 0.01a	1.52 ± 0.03a
C ₁ L ₃	1.08 ± 0.07a	0.49 ± 0.03a	1.57 ± 0.1a
C ₂ L ₁	0.85 ± 0.07b	0.40 ± 0.03b	1.25 ± 0.1b
C ₂ L ₂	0.80 ± 0.14b	0.39 ± 0.06b	1.19 ± 0.2b
C ₂ L ₃	0.63 ± 0.13c	0.32 ± 0.05c	0.95 ± 0.17c
CO ₂ 浓度 Concentration of CO ₂ (C)	**	**	**
Sig. 光照强度 Light intensity (L)	NS	NS	NS
C × L	*	*	*

C₁L₁、C₁L₂、C₁L₃、C₂L₁、C₂L₂、C₂L₃详细处理同表1所列；不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)，NS差异不显著($P > 0.05$)，*、** 分别表示差异显著($P < 0.05$)和差异极显著($P < 0.01$)；下同。

C₁L₁, C₁L₂, C₁L₃, C₂L₁, C₂L₂, C₂L₃ are presented in Table 1; Different lowercase letters within the same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level. “NS” indicates nonsignificant differences at the 0.05 level; * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. This is applicable for the following tables and figures as well.

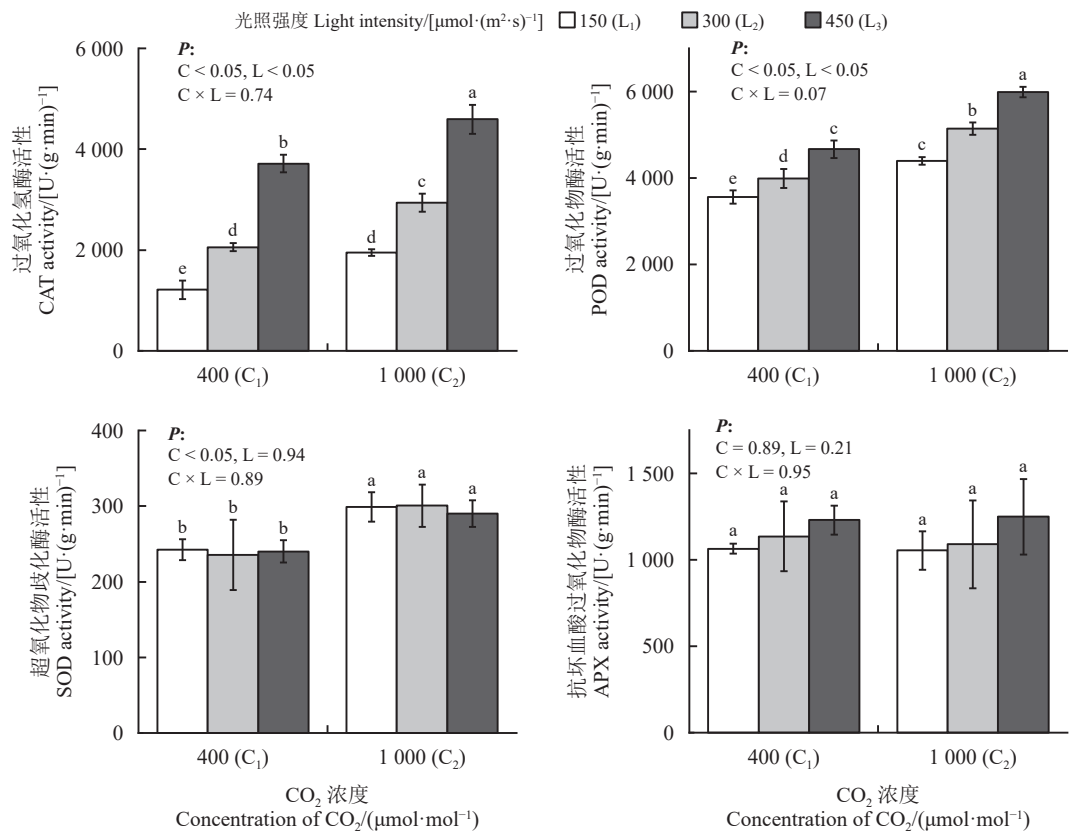


图 1 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗抗氧化酶活性的影响

Figure 1 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on antioxidant enzyme activity of tall fescue seedlings

2.2 CO₂ 加富与 LED 光强对高羊茅的生长指标的影响

2.2.1 生长速率

CO₂ 浓度与 LED 光强均对高羊茅的生长速率

呈现显著影响 ($P < 0.05$) (表 3)。草坪的生长速率随着光照强度的增加呈现出先升高后降低的趋势，CO₂ 加富处理则进一步增加了这一趋势。培养 1~10 d，C₁L₂ 的草坪生长速率显著高于 C₁L₁ 与 C₁L₃。除

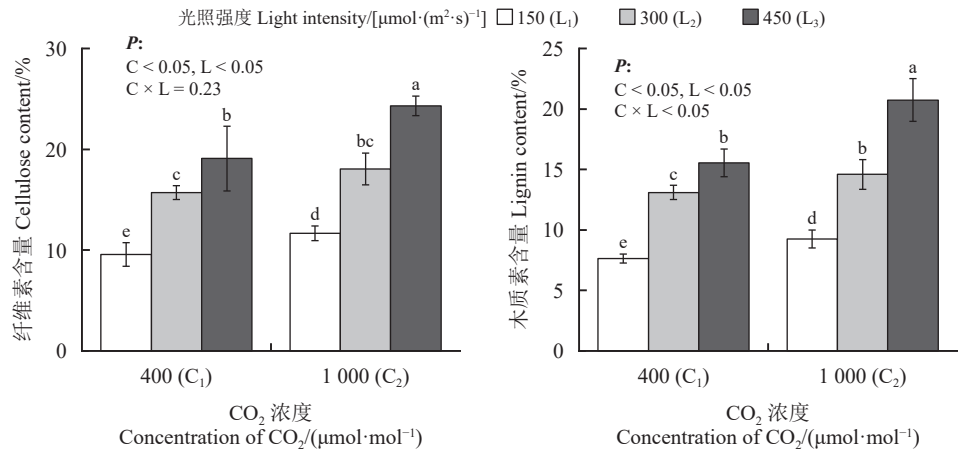


图 2 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗纤维素与木质素含量的影响

Figure 2 Effect of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on cellulose and lignin content of tall fescue seedlings

表 3 CO₂ 加富与不同光强处理下对幼苗高羊茅生长速率的影响

Table 3 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on growth rate of tall fescue seedlings

		生长天数 Growth days		
处理 Treatment		1~10 d	11~20 d	21~30 d
	C ₁ L ₁	0.50 ± 0.03e	0.51 ± 0.03d	0.35 ± 0.04c
	C ₁ L ₂	0.63 ± 0.06c	0.69 ± 0.06c	0.47 ± 0.04b
	C ₁ L ₃	0.54 ± 0.06de	0.41 ± 0.03e	0.26 ± 0.04d
	C ₂ L ₁	0.74 ± 0.03b	0.90 ± 0.05b	0.46 ± 0.03b
	C ₂ L ₂	0.99 ± 0.07a	1.01 ± 0.06a	0.67 ± 0.07a
	C ₂ L ₃	0.61 ± 0.03cd	0.68 ± 0.06c	0.30 ± 0.03cd
CO ₂ 浓度 Concentration of CO ₂ (C)		**	**	**
Sig.	光照强度 Light intensity (L)	**	**	**
	C × L	**	NS	*

L₃ 外, CO₂ 加富处理的草坪生长速率显著高于大气 CO₂ 浓度处理。培养 11~20 d, C₁L₂ 相较于 C₁L₁ 与 C₁L₃ 草坪生长速率显著提升。CO₂ 浓度加富下的所有处理的草坪生长速率均高于大气浓度处理。培养 21~30 d, 此阶段下所有处理的草坪生长速率相较于之前都有所下降, 但是其仍表现出随着光照强度的增加先升高后降低的趋势, 且 CO₂ 浓度加富会进一步放大此趋势。

2.2.2 叶片性状

高羊茅的叶片长度、叶片宽度和叶面积均随着光照强度增大呈现出先上升后下降的趋势 (图 3), 在大气 CO₂ 浓度下, C₁L₂ 相较于 C₁L₁ 和 C₁L₃ 叶片长度和叶片宽度均显著提升 ($P < 0.05$)。C₁L₂ 的叶面积显著高于 C₁L₃, 但相较于 C₁L₁ 无显著差异 ($P > 0.05$)。CO₂ 加富下各处理的叶片长度、叶片宽度和

叶面积均有所提升。其中, C₂ 浓度下的所有处理的叶面积均显著高于 C₁。

2.2.3 根系性状

草坪的总根长、根表面积和根体积均随着光照强度的增加而增加 (图 4), 在大气 CO₂ 浓度处理下, C₁L₂ 相较于 C₁L₁ 总根长、根表面积和根体积显著提升 ($P < 0.05$); 当光照强度达到 450 μmol·(m⁻²·s)⁻¹ 时总根长、根表面积和根体积均达到最大, 但相较于 C₁L₂ 提升不显著 ($P > 0.05$)。CO₂ 加富则显著提升了所各处理的草坪总根长、根表面积和根体积。

2.2.4 生物量

草坪的地上生物量呈现出随着光照强度的增加先升高后降低的趋势 (图 5)。大气 CO₂ 浓度下, C₁L₂ 相较于 C₁L₁ 和 C₁L₃ 地上生物量显著提升 ($P < 0.05$)。CO₂ 浓度加富则进一步放大了这一趋势, C₂L₂

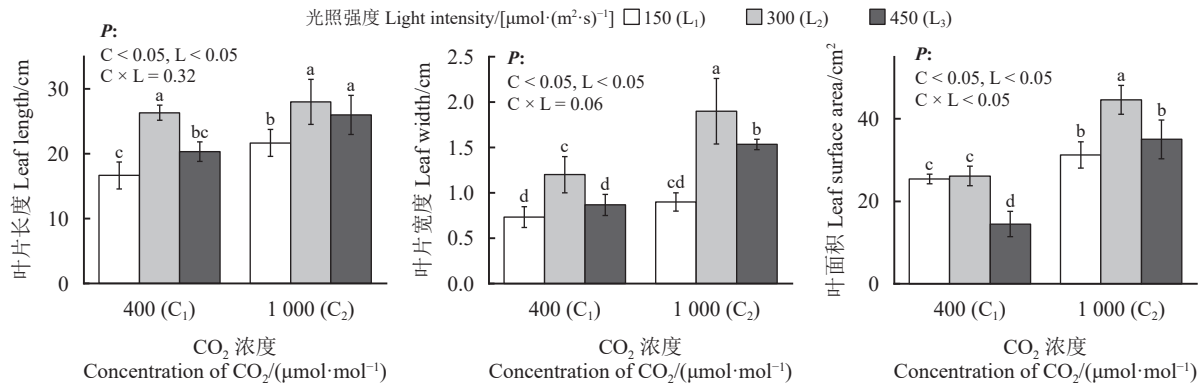


图 3 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗叶片性状的影响

Figure 3 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on leaf characteristics of tall fescue seedlings

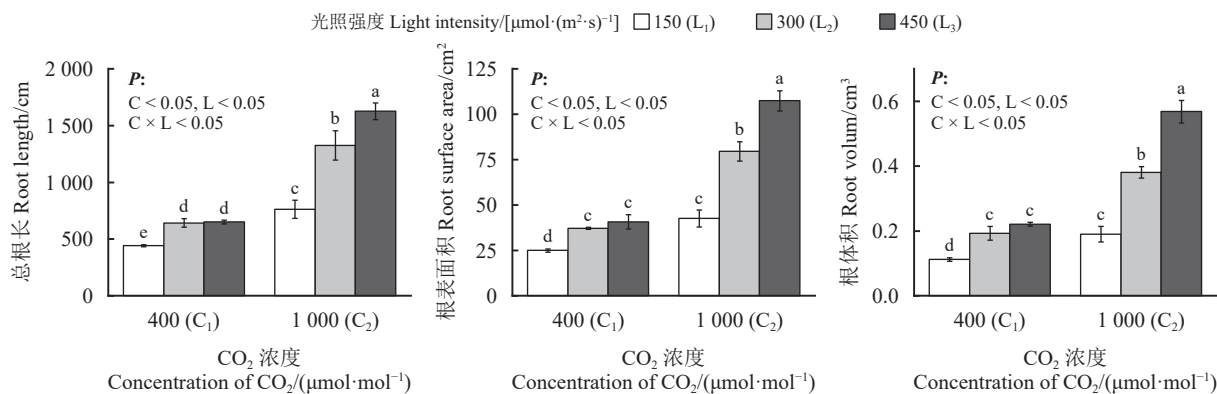


图 4 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗根系性状的影响

Figure 4 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on root characteristics of tall fescue seedlings

的地上生物量相较于 C₂L₁ 与 C₂L₃ 的地上生物量显著提升了 175.7% 和 27.2% ($P < 0.05$)。

草坪地下生物量随光照强度的增强不断增高, 大气 CO₂ 浓度下, C₁L₃ 的地下生物量最多, 但相较于 C₁L₂ 并没有显著差异 ($P < 0.05$)。除 L₁ 外, CO₂ 加富使每个处理的地下生物量显著提升, 尤其是 C₂L₃, 相较于 C₁L₃ 地下生物量显著提高了 114.6%。

2.3 CO₂ 加富与不同光强对高羊茅草坪的坪观质量的影响

2.3.1 NDVI 与色泽

草坪 NDVI 和色泽均随着光照强度的增加呈现出先升高后降低的趋势 (图 6)。在大气 CO₂ 浓度下, C₁L₂ 的草坪 NDVI 与色泽显著高于 C₁L₁ 和 C₁L₃ ($P < 0.05$), 但 C₁L₃ 与 C₁L₁ 间的草坪 NDVI 与色泽无显著差异 ($P > 0.05$)。除 L₃ 外, CO₂ 加富处理的草坪 NDVI 与色泽显著低于大气 CO₂ 浓度处理。

2.3.2 密度与均一性

随光照强度增加, 草坪密度呈现出先增加后降

低的趋势 (图 7), 但是 CO₂ 浓度与光照强度对所有处理的草坪密度均没有显著影响 ($P > 0.05$)。

随光照强度的增加, 草坪均一性呈现出先升高后降低的趋势 (图 7)。在大气 CO₂ 浓度处理下, C₁L₂ 的草坪均一性显著高于 C₁L₁ 与 C₁L₃ ($P < 0.05$)。CO₂ 加富则进一步提升了不同光照强度处理下的草坪均一性, C₂L₂ 的草坪均一性显著高于其他各处理。

3 讨论

3.1 CO₂ 加富与光照强度对高羊茅幼苗生理指标的影响

叶绿素具有传递和吸收光量子的功能, 是植物主要的光合色素之一。叶绿素含量与植物光能利用率呈正比, 影响植物的光合能力 [24-25]。本研究, 在大气 CO₂ 浓度下, 叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量随着光照强度增大而增大 (表 2)。有研究指出, 不同光照强度会影响植物的光合色素含量。低光强下植物通过降低自身的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总

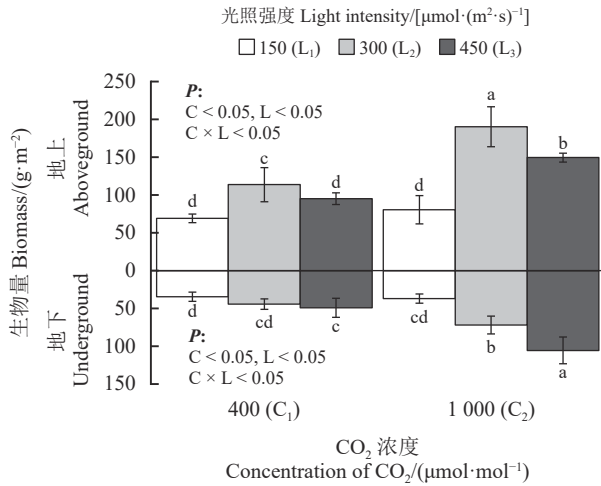


图 5 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗生物量的影响

Figure 5 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on biomass of tall fescue seedlings

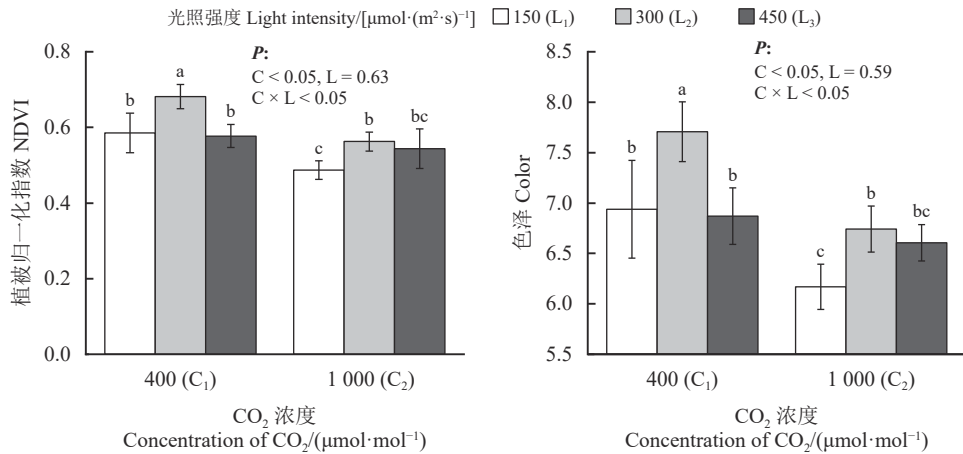


图 6 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗 NDVI 与色泽的影响

Figure 6 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on NDVI and coloration of tall fescue seedlings

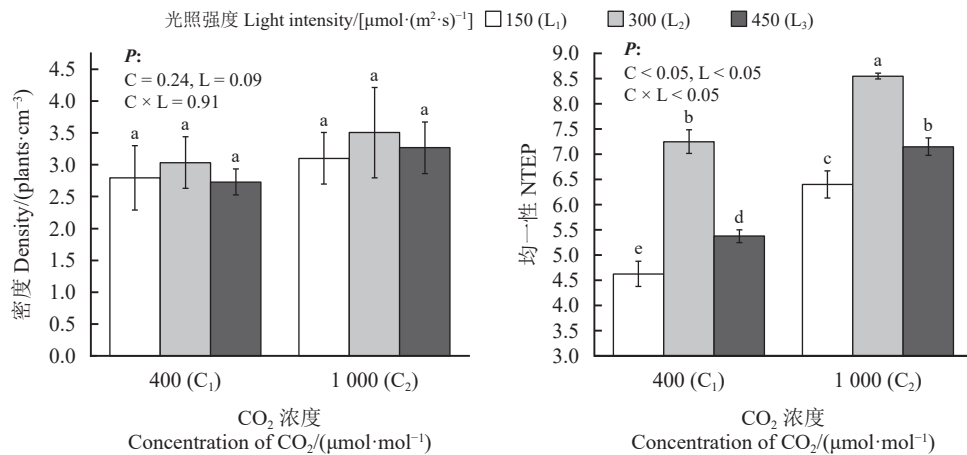


图 7 CO₂ 加富与不同光强处理下对高羊茅幼苗密度与均一性的影响

Figure 7 Effects of CO₂ enrichment and different light intensity treatments on density and NTEP of tall fescue seedlings

叶绿素含量来适应弱光环境^[26]。随着光照强度的增加,植物叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量开始上升^[14]。本研究中,在相同的光照强度下,CO₂ 加富显著降低了各个处理的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量(表 2),有大量研究指出,在高浓度 CO₂ 环境下,植物的叶绿素含量会下降^[17,27-29]。这可能因为 CO₂ 加富会抑制植物体内合成叶绿素的相关基因的转录^[30],也有可能是因为高浓度 CO₂ 下,植物体内的氮素被优先分配至其他光合代谢的中间产物中,植物的相对氮含量降低,限制了叶绿素的合成^[29,31]。

植物的抗氧化酶可以清除植物受到逆境时所产生的过氧化氢和活性氧等物质,其含量的多少影响着植物的抗逆性^[32-33]。本研究中,高羊茅的 CAT 活

性和 POD 活性随着光照强度的增加而增加。在相同的光照强度下, CO₂ 加富则显著增加了高羊茅的 CAT、POD 和 SOD 活性(图 1)。有研究发现,随着光照强度的增加,番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 幼苗体内的 CAT 活性和 POD 活性均会增高, CO₂ 加富则显著提升了黄瓜幼苗 SOD 活性和 POD 活性^[34-35]。这说明随着光照强度的增加,高羊茅叶片中的 CAT 和 POD 共同作用清除植物体内的活性氧的能力增大, CO₂ 浓度升高则提升了高羊茅的光合作用,光合产物增多,体内的抗坏血酸含量随之上升,从而提升了高羊茅体内的抗氧化酶的活性,清除了高羊茅体内多余的活性氧,最终提升了高羊茅的抗氧化能力^[36]。

草坪草的耐践踏能力一直是学者研究的重点之一。有研究指出草坪草叶片中的纤维素、木质素等细胞壁成分含量越多,草坪的耐践踏性就越强^[37]。本研究中,随着光照强度的增大,高羊茅叶片中的纤维素和木质素含量均显著提升(图 2)。有研究发现,植物体内的纤维素和木质素含量与光照强度呈正相关关系^[38-39], CO₂ 加富处理则可以提升植物体内的纤维素含量与木质素含量^[15-16]。说明 CO₂ 浓度加富与高光照强度更有利于叶片中纤维素与木质素的合成,从而提高高羊茅的耐践踏性,有利于草皮成熟后的机械化移栽,也有利于运动场的使用。

3.2 CO₂ 加富与光照强度对高羊茅幼苗生长指标的影响

草坪生长速率可以代表草坪草干物质积累速度,地上生物量则代表了草坪草干物质积累量,叶片形态则跟植物的光合作用强弱相关。随着光照强度逐渐增大,高羊茅的草坪生长速率、叶片形态和地上生物量均呈现出先增长后降低的趋势(表 3、图 3、图 5)。有研究发现,随着光照强度逐渐增大,大麦草 (*Hordeum violaceum*)、费菜 (*Sedum aizoon*) 的生长速率以及番茄幼苗的叶片形态与地上生物量都呈现出先升高后降低的趋势^[13, 40-41]。光强过低,高羊茅叶片无法获得充足的光能,对光能的转化和利用率较低。光强过高,会对高羊茅叶片产生光抑制效应,从而导致高羊茅生长速率、叶片各个形态和地上生物量的降低^[42]。本研究中,在相同的光强下, CO₂ 加富处理能提升高羊茅幼苗的生长速率、叶长、叶宽、叶面积以及地上生物量(表 3、图 3、图 5)。这可能因为 CO₂ 加富增加了植物的碳供应,

使植物获得了更多的碳源和能量,从而提升了植物的光合碳同化进程,植物的生长速率、叶片形态和地上生物量也得到相应提升^[43]。

草坪的根系形态影响着草坪对逆境的抗性,其中,根系长度决定了根对水肥的吸收范围,根面积决定了根对水肥的吸收量,根体积则影响着根系对土壤的加固程度,对坪床的稳定性也有一定影响^[44]。本研究中,在相同的 CO₂ 浓度下,植物根系长度、根表面积、根体积以及地下生物量均随着光照强度的增加而增加(图 4、图 5)。有研究发现,光照强度越高,水稻 (*Oryza sativa*) 的发根能力越强,根系生长量越大^[45],这与本研究的结果一致。充足的光照有利于高羊茅幼苗的根系形态发育,光照强度的增加则有利于高羊茅幼苗的光合作用,地上部分能产生更多的有机产物并分配给地下,从而提升高羊茅幼苗的根系形态指标^[46-48]。在相同的光照强度下, CO₂ 加富处理使高羊茅的根系长度、根表面积、根体积和地下生物量提升(图 3、图 5)。有研究发现,随着 CO₂ 浓度的增加,大豆 (*Glycine max*) 的根须变长,且主根数和侧根数明显增加^[49]。CO₂ 加富促进了高羊茅的碳水化合物合成,使根系获得更多的营养物质,活性升高。从整体上来看, CO₂ 加富和中高光强处理显著提升了高羊茅的各个根系形态和地下生物量,其中以 CO₂ 加富和 450 μmol·(m²·s)⁻¹ 光照强度处理最为显著。

3.3 CO₂ 加富与光照强度对高羊茅幼苗坪观质量的影响

植物对于生长所需的光照强度存在一个阈值,在此范围内植物的光合速率随着光照强度的增加而增加,对光能的利用率最高^[50]。过低或者过高的光照强度都会导致植物的光合作用受到抑制,色泽变差^[51-53]。在本研究中,NDVI、色泽、密度和均一性均表现出随着光照强度的增强先增加后减小的趋势(图 6、图 7),表明当光强小于 300 μmol·(m²·s)⁻¹ 时,增加光照强度可以提升高羊茅光合作用的能力。当光照强度达到 450 μmol·(m²·s)⁻¹ 时,高羊茅通过减小叶面积(图 3),降低地上生长部分等措施来应对高光强对其造成的光合系统损伤,这也导致了草坪的坪观质量降低。有研究表明,高浓度 CO₂ 环境下,植物的叶片中累计的糖分会抑制合成叶绿素

基因的转录,从而导致植物的叶绿素含量整体下降^[30]。这可能是相同的光照强度处理下,CO₂加富降低了草坪 NDVI 和色泽的主要原因(图 6、图 7)。

4 结论

本研究以高羊茅为对象,进行不同 CO₂ 浓度处理和光照处理,探究 CO₂ 浓度和光照强度对高羊茅幼苗生长发育影响。研究发现,在适当的光照强度下为植物工厂培养高羊茅幼苗施加 CO₂ 气肥会对降低高羊茅的叶片的 NDVI 和色泽,对草坪外观质量产生一定的不利影响,但从整体上看,CO₂ 加富和中等光强能显著提升高羊茅幼苗的生长速率和

地上生物量,更有利于高羊茅幼苗的叶片形态建成。同时提升了高羊茅幼苗体内的 CAT、SOD 和 POD 活性,增强了高羊茅幼苗的抗氧化能力,提升了高羊茅叶片中纤维素与木质素的含量,促进了高羊茅的光合作用,更有利于高羊茅幼苗的生长发育。植物工厂若想生产外观质量较佳的高羊茅草坪,只需要适度增强光照强度,若想加快高羊茅的生产速率,获得生长质量更佳的根系以及叶片的高羊茅草坪,则在适度增强光照强度的基础上为高羊茅补充 CO₂ 气肥即可。其中光照强度 300 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、CO₂ 浓度 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 作为一种较佳的光气配比,可以为植物工厂培育高羊茅提供理论参数。

参考文献 References:

- [1] PEREYDA-GONZÁLEZ J M, DE-LA-PEÑA C, TEZARA W, ZAMORA-BUSTILLOS R, ANDUEZA-NOH R H, NOH-KÚ J G, CARRERA-MARÍN M, GARRUÑA R. High temperature and elevated CO₂ modify phenology and growth in pepper plants. *Agronomy*, 2022, 12(8): 18-36.
- [2] KAUR H, KUMAR A, CHOUDHARY A, SHARMA S, CHOUDHARY D R, MEHTA S. Effect of elevated CO₂ on plant growth, active constituents, and production. // HUSEN A. *Plants and Their Interaction to Environmental Pollution*. Wolaita: Wolaita Sodo University, 2023: 61-77.
- [3] 张彤, 王磊, 杨俊兴. CO₂ 倍增对干旱胁迫下大豆光合效应的影响. *河南农业科学*, 2005(8): 47-50.
ZHANG T, WANG L, YANG J X. Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthetic efficiency soybean under drought stress. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(8): 47-50.
- [4] 张瑞朋, 付连舜, 佟斌, 吴晓秋, 朱海荣, 孙国伟. 大豆叶片光合作用与光强及二氧化碳的关系. *吉林农业科学*, 2015, 40(3): 8-13.
ZHANG R P, FU L S, TONG B, WU X Q, ZHU H R, SUN G W. The relationship of soybean leaf photosynthesis with light intensity and carbon dioxide. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(3): 8-13.
- [5] FAN X X, XU Z G, LIU X Y, TANG C M, WANG L W, HAN X L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 2013, 153: 50-55.
- [6] 顾梦云, 曾伟达, 宿庆连, 黄明翅, 冯肖梅, 刘艳艳, 张雪莲, 周晓云. 不同 LED 光质配比和光照强度对红掌新品种福星组织培养的影响. *广东农业科学*, 2023, 50(5): 46-55.
GU M Y, ZENG W D, SU Q L, HUANG M C, FENG X M, LIU Y Y, ZHANG X L, ZHOU X Y. Effects of different LED light quality ratio and light intensity on tissue culture of a new *Anthurium andraeanum* cultivar Fuxing. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(5): 46-55.
- [7] 王君, 杨其长, 全宇欣. 红蓝光下光强对生菜电能、光能利用效率及品质的影响. *中国农业大学学报*, 2016, 21(8): 59-66.
WANG J, YANG Q C, TONG Y X. Effects on electric-energy and light use efficiency and quality for lettuce under different light intensities supplied with red light and blue light. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 59-66.
- [8] 李双鸽, 赵亚臣, 李慧, 黄显章, 吴婷, 雷咪, 刘大会. 不同遮荫度对宽叶山萵生长和品质的影响. *中国中药杂志*, 2023, 48(14): 3715-3721
LI S G, ZHAO Y C, LI H, HUANG X Z, WU T, LEI M, LIU D H. Effects of shading intensity on growth and quality of *Artemisia stolonifera*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(14): 3715-3721.
- [9] CAMINOS T S, ESTEVEZ S J. Effects of shade on the persistence of cool-season grasses to form turfgrass. *Agricultura Técnica*, 2007, 67(4): 372-383.

- [10] 李清明, 仝宇欣, 杨晓, 杨其长. 国内外植物工厂研究进展与发展趋势. 农业工程技术, 2022, 42(10): 49-53.
LI Q M, TONG Y X, YANG X, YANG Q C. Research progress and development trends of domestic and foreign plant factories. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(10): 49-53.
- [11] 杨其长. 植物工厂. 北京: 清华大学出版社, 2019.
YANG Q C. *Plant Factory*. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [12] 黄松, 刘勇鹏, 孙凯乐, 张婵, 孙治强, 朴凤植, 张涛. 不同 LED 光强补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响. 山东农业科学, 2023, 55(6): 62-68.
HUANG S, LIU Y P, SUN K L, ZHANG C, SUN Z Q, PIAO F Z, ZHANG T. Effects of different LED light intensities on growth, yield and quality overwintering tomato in solar greenhouse. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(6): 62-68.
- [13] 季方, 甘佩典, 刘男, 贺冬仙, 杨珀. LED 光质和日累积光照量对番茄种苗生长及能量利用效率的影响. 农业工程学报, 2020, 36(22): 231-238.
JI F, GAN P D, LIU N, HE D X, YANG P. Effects of LED spectrum and daily light integral on growth and energy use efficiency of tomato seedlings. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(22): 231-238.
- [14] 程亚娇, 谌俊旭, 王仲林, 范元芳, 陈思宇, 李泽林, 刘沁林, 李中川, 杨峰, 杨文钰. 光强和光质对大豆幼苗形态及光合特性的影响. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2655-2663.
CHENG Y J, CHEN J X, WANG Z L, FAN Y F, CHEN S Y, LI Z L, LIU Q L, LI Z C, YANG F, YANG W Y. Effects of light intensity and light quality on morphological and photosynthetic characteristics of soybean seedlings. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2655-2663.
- [15] 刘亚静. 大气 CO₂ 浓度升高对谷子茎叶生理特性及代谢组影响. 太原: 山西农业大学硕士学位论文, 2023.
LIU Y J. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on physiological characteristics and metabolomics of stems and leaves in foxtail millet. Master thesis. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [16] 胡晓雪, 宗毓铮, 张仟雨, 董琦, 尹美强, 李萍, 郝兴宇. CO₂ 浓度升高对万寿菊生长发育与光合生理的影响. 核农学报, 2017, 31(6): 1210-1216.
HU X X, ZONG Y Z, ZHANG Q Y, DONG Q, YIN M Q, LI P, HAO X Y. Effects of elevated CO₂ concentration on growth and photosynthetic physiology in marigold. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(6): 1210-1216.
- [17] 朱世东, 徐文娟. 大棚樱桃番茄 CO₂ 加富的生理效应. 安徽农业大学学报, 2002, 29(2): 127-131.
ZHU S D, XU W J. Physiological effects of CO₂ enrichment on *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* in the plastic house. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2002, 29(2): 127-131.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2003.
ZOU Q. *Experimental Guidance in Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Press, 2003.
- [19] 李锦树, 王洪春, 王文英, 朱亚芳. 干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响. 植物生理学报, 1983, 9(3): 223-229.
LI J S, WANG H C, WANG W Y, ZHU Y F. Effects of drought on the permeability and membrane lipid composition from maize leaves. *Acta Phytophysiology Sinica*, 1983, 9(3): 223-229.
- [20] BI X Y, GUO H Y, LI X D, ZHENG L J, AN M N, XIA Z H, WU Y H. A novel strategy for improving watermelon resistance to cucumber green mottle mosaic virus by exogenous boron application. *Molecular Plant Pathology*, 2022, 23(9): 1361-1380.
- [21] FAN F H, ZHOU Z J, QIN H J, TAN J H, DING G J. Exogenous brassinosteroid facilitates xylem development in *Pinus massoniana* seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(14): 7615.
- [22] 周丽甜. 践踏对不同植丝密度混合草坪质量的影响. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2019.
ZHOU L T. The influence of traffic frequency on the quality of stitched hybrid turf with different density. Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [23] 陈谷, 马其东. NTEP 评价体系在草坪草评价中的应用. 草业科学, 2000, 17(1): 62-69.
CHEN G, MA Q D. Application of NTEP in turfgrass evaluation. *Pratacultural Science*, 2000, 17(1): 62-69.
- [24] 姜武, 姜卫兵, 李志国. 园艺作物光合性状种质差异及遗传表现研究进展. 经济林研究, 2007, 25(4): 102-108.
JIANG W, JIANG W B, LI Z G. Advance of researches on germplasm differences and genetic expression of photosynthetic traits in horticultural crops. *Nonwood Forest Research*, 2007, 25(4): 102-108.
- [25] 张斌斌, 姜卫兵, 翁忙玲, 韩键. 遮荫对红叶桃叶片光合生理的影响. 园艺学报, 2010, 37(8): 1287-1294.

- ZHANG B B, JIANG W B, WENG M L, HAN J. Effects of shading on photosynthetic characteristics of red-leaf peach. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(8): 1287-1294.
- [26] 杨娟, 王志勇, 郭海林, 丁西朋, 杨虎彪, 吴杨, 廖丽. 光强对耐荫差异普通钝叶草 (*Stenotaphrum helferi*) 种质的形态与生理差异分析. *热带作物学报*, 2020, 41(12): 2454-2461.
- YANG J, WANG Z Y, GUO H L, DING X P, YANG H B, WU Y, LIAO L. Effects on different shading intensity on the morphology and physiology of *Stenotaphrum helferi* accessions with significant differences in shade tolerance. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(12): 2454-2461.
- [27] 于景金. 高浓度 CO₂ 下高羊茅应对温度和水分变化的生理生化响应及其机理. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2012.
- YU J J. Alleviation effects of elevated CO₂ on physiological and biochemical responses to temperature and water in tall fescue. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [28] 赵国锦. 高浓度 CO₂ 对温室番茄光合特性的影响. *北方园艺*, 2007(9): 79-81.
- ZHAO G J. Effect of elevated CO₂ concentration on the photosynthetic characteristics of tomato in solar greenhouse. *Northern Horticulture*, 2007(9): 79-81.
- [29] BALTA S. The effects of elevated CO₂ on growth and physiological responses of plants grown in closed microcosmos. Master thesis. Krakow: University of Agriculture in Krakow, 2023.
- [30] 郑凤英, 彭少麟. 植物生理生态指标对大气 CO₂ 浓度倍增响应的整合分析. *植物学报*, 2001, 43(11): 1101-1109.
- ZHENG F Y, PENG S L. Meta-analysis of the response of plant ecophysiological variables to doubled atmospheric CO₂ concentrations. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(11): 1101-1109.
- [31] 谢辉, 范桂枝, 荆彦辉, 东丽, 邓华凤. 植物对大气 CO₂ 浓度升高的光合适应机理研究进展. *中国农业科技导报*, 2006, 8(3): 29-34.
- XIE H, FAN G Z, JING Y H, DONG L, DENG H F. Progress of research on photosynthetic acclimation of plant to elevate atmospheric CO₂. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(3): 29-34.
- [32] GERAMI M, GHORBANI A, KARIMI S. Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium-induced toxicity in *Salvia officinalis* L. *Journal of Plant Biology Sciences*, 2018, 10(1): 81-96.
- [33] 王孟昌, 侯君佑, 盖盼盼, 耿兵婕, 黄正来, 张文静, 樊永惠, 马尚宇. 花后渍水对小麦根系抗氧化酶活性、旗叶光合特性及产量的影响. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(1): 8-15.
- WANG M C, HOU J Y, GAI P P, GENG B J, HUANG Z L, ZHANG W J, FAN Y H, MA S Y. Effects of post-anthesis waterlogging on root antioxidant enzyme activities, flag leaf photosynthetic characteristics and yield of wheat. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(1): 8-15.
- [34] 刘晓英, 焦学磊, 徐志刚, 常涛涛. 不同红蓝 LED 光照强度对樱桃番茄幼苗生长和抗氧化酶活性的影响. *南京农业大学学报*, 2015, 38(5): 772-779.
- LIU X Y, JIAO X L, XU Z G, CHANG T T. Effects of different red and blue LED light intensity on growth and antioxidant enzyme activity of cherry tomato seedlings. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(5): 772-779.
- [35] 魏珉, 邢禹贤, 马红, 王秀峰, 李滨. 果菜苗期 CO₂ 施肥壮苗效果研究. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2000, 31(2): 196-200.
- WEI M, XING Y X, MA H, WANG X F, LI B. Effects of CO₂ enrichment in raising vigorous seedlings of fruited vegetable. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2000, 31(2): 196-200.
- [36] 郭娇. 不同时期加富 CO₂ 对温室番茄生理特性及果实生长的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2022.
- GUO J. Effects of CO₂ enrichment in different periods on physiological characteristics and fruit growth of greenhouse tomato. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [37] SHEARMAN R C, BEARD J B. Turfgrass wear tolerance mechanisms: II. Effects of cell wall constituents on turfgrass wear tolerance. *Agronomy Journal*, 1975, 67(2): 211-215.
- [38] 陈斌. 4 种鸭跖草科植物对不同光强的适应能力及响应策略的分析. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2020.
- CHEN B. Analysis of four species of Commelinaceae adaptability and response strategies under different light intensities. Master Thesis. Haerbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [39] 聂晓玉. 施氮量与种植密度对角果期遮阴油菜产量和品质的影响. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2021.
- NIE X Y. Effects of nitrogen application rate and planting density on rapeseed yield and quality under shading at podding stage.

- Master Thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [40] 万茂科, 苗洪利, 程广壮, 孙九胜, 杨金钰, 乔小燕. 光强和光周期对大麦草生长速率的影响. *照明工程学报*, 2020, 31(4): 145-151.
WAN M K, MIAO H L, CHENG G Z, SUN J S, YANG J Y, QIAO X Y. Effects of light intensity and photoperiod on the growth rate of barley grass. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(4): 145-151.
- [41] 朱小青, 杨柳青, 曾红, 吴红强, 刘志昂, 廖飞勇, 陈月华, 黄琛斐. 不同光照强度对费菜形态和生理特性的影响. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(6): 98-102.
ZHU X Q, YANG L Q, ZENG H, WU H Q, LIU Z A, LIAO F Y, CHEN Y H, HUANG C F. Effects of different illumination intensity conditions on morphological and physiology characteristic of *Sedum aizoon* L. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(6): 98-102.
- [42] 宸珩, 杨文强. 光合生物光抑制现象与光保护措施. *植物生理学报*, 2023, 59(4): 705-714.
YI H, YANG W Q. Photoinhibition and photoprotection of photosynthetic organisms. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(4): 705-714.
- [43] MAKINO A, HARADA M, SATO T, NAKANO H, MAE T. Growth and N allocation in rice plants under CO₂ enrichment. *Plant Physiology*, 1997, 115(1): 199-203.
- [44] 张桐瑞, 李富翠, 韩烈保, 陈雨峰, 宋桂龙, 张亚楠, 陈佳宝, 唐斌, 窦玮豪. 践踏对草垫式人造-天然混合草坪质量的影响. *草业学报*, 2021, 30(10): 26-40.
ZHANG T R, LI F C, HAN L B, CHEN Y F, SONG G L, ZHANG Y N, CHEN J B, TANG B, DOU W H. Effects of trampling intensity on the quality of artificial carpet hybrid turf. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 26-40.
- [45] 倪文. 光对稻苗根系生长及其生理活性的影响. *作物学报*, 1983, 9(3): 199-204.
NI W. Effects of light on rice seedling root growth and physiological activity. *Acta Agronomica Sinica*, 1983, 9(3): 199-204.
- [46] 崔志青, 贺德先, 赵全志, 王晨阳, 史晓江, 任介新, 马元喜. 光对作物根系影响研究进展. *河南农业大学学报*, 2005, 39(4): 29-31.
CUI Z Q, HE D X, ZHAO Q Z, WANG C Y, SHI X J, REN J X, MA Y X. Research progress on effects of light on crop root system. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(4): 29-31.
- [47] 韩鹰, 朱旭东, 耿晓东, 王忠. 光照对水培风信子根系生长的影响. *扬州大学学报 (农业与生命科学版)*, 2005, 26(4): 79-82.
HAN Y, ZHU X D, GENG X D, WANG Z. Studies on the root growth of hydroponic hyacinth effected by light. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2005, 26(4): 79-82.
- [48] 王文林, 王国祥, 万寅婧, 夏劲, 唐晓燕, 陈昕, 梁斌, 庄巍. 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响. *生态学报*, 2013, 33(12): 3688-3696.
WANG W L, WANG G X, WAN Y J, XIA J, TANG X Y, CHEN X, LIANG B, ZHUANG W. The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3688-3696.
- [49] ROGERS H H, PETERSON C M, MCCRIMMON J N, CURE J D. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(6): 749-752.
- [50] 李涛, 杨其长. 设施园艺生产人工补光理论初探. *农业工程技术*, 2018, 38(16): 48-52.
LI T, YANG Q C. Preliminary exploration of artificial supplementary lighting theory in protected horticultural production. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(16): 48-52.
- [51] ZHANG J J, ZHU L, ZHANG X, ZHOU J, GUY R D. Photosynthetic performance and growth responses of *Liriope muscari* (Decne.) L. H. Bailey (*Asparagaceae*) to different levels of irradiance in three seasons. *Flora*, 2021, 278: 151798.
- [52] 文素芸. 低氮对弱光下高羊茅耐荫性的影响. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2022.
WEN S Y. Effects of low nitrogen on shade tolerance of tall fescue under low light stress. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [53] SWANN K, HADLEY P, ELSE M A, PEARSON S, BADIEE A, TWITCHEN C. The effect of light intensity and duration on yield and quality of everbearer and June-bearer strawberry cultivars in a LED lit multi-tiered vertical growing system. *Acta Horticulturae*, 2021, 1309: 359-366.

(责任编辑 王芳)