

6种屋顶绿化植物对高温干旱复合胁迫的耐受性综合评价

梁 伟*,甄龙霞

河北美术学院,河北 新乐 050700

摘 要: 高温、干旱是夏季屋顶环境中限制绿化植物生长发育的主要因素。为筛选适宜屋顶栽植的绿化植物,以金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花为试验材料,于人工智能气候室模拟高温干旱胁迫,测定株高、整株生物量(干重)、叶片相对含水量、叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、相对电导率、MDA含量、抗氧化酶活性等形态和生理指标,并采用隶属函数法综合评价6种绿化植物的耐受性。结果表明,高温干旱复合胁迫可显著降低绿化植物株高、整株干重、叶片相对含水量、叶绿素含量、 P_n 和 G_s ,显著提升绿化植物叶片相对电导率、MDA含量、SOD活性、POD活性和CAT活性。心叶日中花的指标变化幅度最大,其株高、整株干重、叶片相对含水量、叶绿素含量、 P_n 和 G_s 分别降低14.89%、15.79%、29.48%、14.25%、16.62%和17.04%;相对电导率、MDA含量、SOD活性、POD活性和CAT活性则分别提升16.12%、14.68%、80.93%、75.35%和69.41%。6种屋顶绿化植物的平均隶属函数值分别为0.73、0.23、0.74、0.00、0.70和0.95。综上所述,对高温干旱复合胁迫的耐受性由强到弱依次为心叶日中花、红叶石楠、金叶女贞、洋竹草、南天竹和锦绣苋。该研究为在高温干旱的夏季屋顶环境中筛选出适宜栽植的绿化植物提供了科学依据,有助于提升屋顶绿化的成功率和生态效益。

关键词: 屋顶绿化; 高温; 干旱; 复合胁迫; 综合评价

中图法分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)05-0993-08

Comprehensive Tolerance Evaluation of Six Roof Greening Plants Under Combined Stresses of High Temperature and Drought

LIANG Wei*, ZHEN Long-xia

Hebei Academy of Fine Arts, Xinle 050700, China

Abstract: High temperature and drought are the primary factors restricting the growth and development of greening plants in summer roof environments. To screen suitable greening plants for roof planting, *Ligustrum × vicaryi*, *Nandina domestica*, *Photinia × fraseri*, *Alternanthera bettzickiana*, *Callisia repens*, and *Mesembryanthemum cordifolium* are used as experimental materials. High-temperature and drought stress are simulated in an artificial intelligence climate chamber to measure morphological and physiological indicators such as plant height, whole-plant biomass (dry weight), leaf relative water content, chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), relative electrical conductivity, malondialdehyde (MDA) content, and antioxidant enzyme activities. The tolerance of the six greening plants is comprehensively evaluated using the membership function method. The results show that the combined stress of high-temperature and drought can significantly reduce the plant height, whole-plant dry weight, leaf relative water content, chlorophyll content, P_n , and G_s of the greening plants, while significantly increasing the leaf relative electrical conductivity, MDA content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, and catalase (CAT) activity. *Mesembryanthemum cordifolium* exhibits the greatest indicator changes, with reductions of 14.89%, 15.79%, 29.48%, 14.25%, 16.62%, and 17.04% in plant height, whole-plant dry weight, leaf relative water content, chlorophyll content, P_n , and G_s , respectively; and increases of 16.12%, 14.68%, 80.93%, 75.35%, and 69.41% in relative electrical conductivity, MDA content, SOD activity, POD activity, and CAT activity, respectively. The average membership function values of the six roof greening plants are 0.73, 0.23, 0.74, 0.00, 0.70, and 0.95, respectively. In conclusion, the tolerance to the combined stress of high-temperature and drought, from strongest to weakest, is *Mesembryanthemum cordifolium*, *Photinia × fraseri*, *Ligustrum × vicaryi*, *Callisia repens*, *Nandina domestica*, and *Alternanthera bettzickiana*. This study provides a scientific basis for selecting greening plants suitable for planting in high-temperature and drought-prone summer roof environments, which can help improve the success rate and ecological benefits of roof greening.

Keywords: Roof greening; high temperature; drought; composite stress; comprehensive evaluation

收稿日期: 2025-10-21

修回日期: 2026-09-16

第1作者简介: 梁 伟,男(1981-),男,硕士,副教授,研究方向:古典园林景观、环境设计。E-mail:1002939073@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: 1002939073@qq.com

近年来,随着我国工业化和城市化的飞速发展及城市人口数量的快速增长,可用于城市绿化的土地面积逐渐减少,难以满足居民对绿色空间的需求^[1,2]。建筑物屋顶被广泛称为城市“第五绿化面”,用其进行绿化不仅可大幅增加城市绿化面积,而且具有净化空气、改善室内温度、削减雨水径流和缓解“热岛效应”等生态功能,已成为缓解居民对绿色空间需求和城市建设用地矛盾的重要手段^[3-5]。绿化植物是屋顶绿化技术的核心,开展屋顶绿化植物的筛选研究对屋顶绿化技术的普及具有重要意义。

屋顶环境具有光照强、夏季温度高、干燥等特点,对绿化植物的选择提出更高要求^[6]。目前,我国屋顶绿化植物多以景天科植物为主,存在景观效果不佳、易发病虫害、易退化等问题,亟待丰富绿化植物种类,增加群落多样性^[7]。前人对屋顶绿化植物的筛选开展了部分研究,如曾红等^[8]采用盆栽控水法和隶属函数法对 4 种屋顶绿化植物的耐旱性进行了综合评价,认为洋竹草、玉吊钟、蕻状景天抗旱能力较强;胡玉咏等^[9]通过热胁迫处理对 4 种屋顶绿化植物的耐热性进行了排序;杨壹等^[10]采用连续干旱胁迫方法对 5 种屋顶绿化常绿植物的耐旱性进行了评价,结果表明常绿植物的耐旱能力不完全一致。屋顶的生长环境往往不是单一非生物胁迫,而是高温、干旱等非生物胁迫的复合发生,对植物造成的影响往往大于单一胁迫的叠加^[11-13]。然而,关于屋顶绿化植物对高温干旱复合胁迫的适应性研究,鲜有相关报道。

因此,本研究综合考虑了植物的耐旱性、耐热性、观赏性、生长速度以及在类似环境下的适应表现等因素,选取了 6 种具有代表性的屋顶绿化植物作为研究对象。采用盆栽控水和人工智能气候室方法进行高温干旱复合胁迫处理,通过测定绿化植物形态和生理生化指标并采用隶属函数法来综合评价屋顶绿化植物适应性,以期屋顶绿化植物选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取金叶女贞(*Ligustrum × vicaryi*)、南天竹(*Nandina domestica*)、红叶石楠(*Photinia ×*

fraseri)、锦绣苋(*Alternanthera bettzickiana*)、洋竹草(*Callisia repens*)和心叶日中花(*Mesembryanthemum cordifolium*)共 6 种常绿植物为材料,均为 1 年生幼苗。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于 2020 年 5 月开始实施。从四川农业大学苗圃选择大小、长势一致,健壮无明显病虫害的幼苗,每种植物设置 5 个生物学重复,定植于内径和高分别为 36 cm 和 30 cm 的花盆中,栽培基质为 $V_{\text{土壤}}:V_{\text{草炭}}:V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=3:3:3:1$,温室生长 2 周后,于型号为 HP1000GS,温度控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度控制精度为 $\pm 3\%$ 等的人工智能气候室进行高温干旱复合胁迫处理。对照组:培养温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}/25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜),光照时长 12 h/d(3 000 lx),采用称重法保持基质含水量为 70%-75%,测定频率为每日上午 9 点和下午 3 点各称重 1 次,以花盆总重量(包含基质和植物)作为称重标准,根据预设含水量范围补充水分。处理组:将幼苗置于温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}/25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜)的培养室,保持基质含水量为 35%-40%。该处理条件基于前期预实验及胡玉咏等^[9]、杨壹等^[10]关于屋顶植物耐热性与抗旱性的研究设定。测定频率同样为每日上午 9 点和下午 3 点各称重 1 次,以花盆总重量(包含基质和植物)作为称重标准,依据预设含水量范围添加水分,其余条件同对照组完全一致。其余条件同处理组完全一致。处理 20 d 后,取样进行生长指标和生理指标测定。

1.2.2 测定指标及方法 所有指标的测定方法参照经典植物生理学文献,均选取植物幼苗的成熟叶片进行测定(整株干重测定涉及全株),具体如下:

株高:直尺测量;

整株干重:烘干称重法;

叶片相对含水量:饱和称重法;

叶绿素含量:丙酮-乙醇浸提法;

P_n 、 G_s :Li-6400XT 光合仪测定;

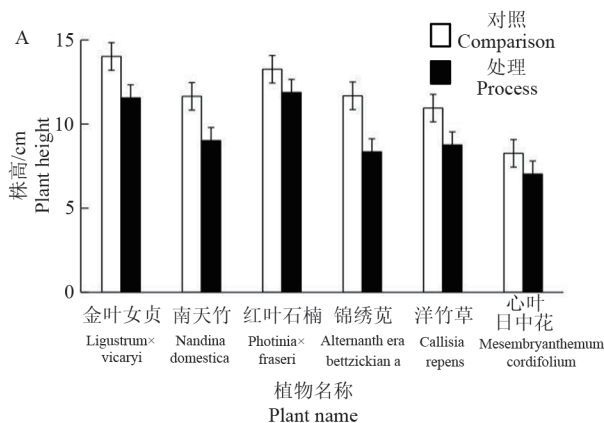
MDA 含量:硫代巴比妥酸法;

相对电导率:浸泡法;

SOD、POD、CAT 活性:分别采用氮蓝四唑光还原法、愈创木酚法、紫外吸收法。

1.3 数据处理及分析

采用 SPSS20.0 软件对实验数据进行整理与差异性分析,统计显著性检验方法采用单因素方差分析,利用 Microsoft Excel 2013 软件进行图表绘制。运用模糊数学隶属函数法综合评估 6 种植物对高温干旱复合胁迫的适应性,若指标与适应能力呈正相关,则先计算某植物某指标测定值与该指标最小值的差,再除以该指标最大值与最小值的差,得到该植物此指标的隶属函数值;若指标与适应能力呈负相关,则用 1 减去上述计算结果,从而得到该植物此指标的隶属函数值。其中,隶属函数值用于衡量植物在特定指标下对胁迫环境的适应程度。



2 结果与分析

2.1 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗株高及整株干重的影响

由图 1 可知,高温干旱复合胁迫可显著降低屋顶绿化植物幼苗的株高和整株干重,且不同物种的降低幅度存在明显差异。与对照相比,金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花幼苗株高分别降低 17.55%、22.58%、10.41%、28.51%、20.00% 和 14.89%;高温干旱复合胁迫条件下,金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花幼苗整株干重分别较对照显著降低 17.31%、22.45%、12.73%、25.00%、20.45% 和 15.79%。

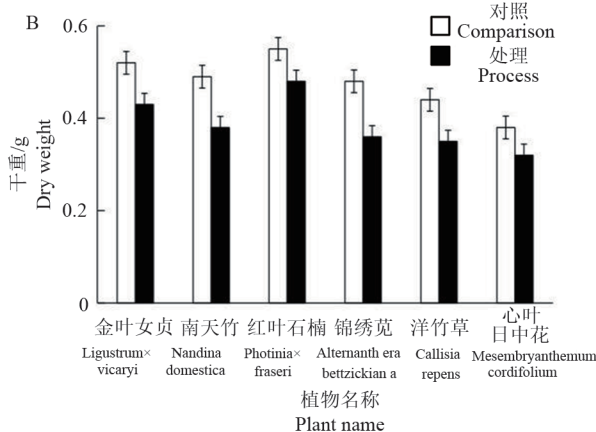


图 1 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗株高及整株干重的影响

Fig.1 Effects of combined high temperature and drought stresses on plant height and dry weight of six rooftop greening plant seedlings

2.2 高温干旱复合胁迫对幼苗叶片相对含水量及叶绿素含量的影响

由图 2 可知,高温干旱复合胁迫可显著降低屋顶绿化植物幼苗叶片相对含水量和叶绿素含量,且降低幅度因物种不同而存在明显差异。高温干旱复合胁迫下,金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花幼苗叶片相对含水量分别降低 36.05%、42.62%、30.82%、46.70%、41.81% 和 29.48%;6 种屋顶绿化植物幼苗叶片叶绿素含量则分别较对照显著降低 17.05%、25.70%、13.60%、27.96%、17.45% 和 14.25%。

2.3 高温干旱复合胁迫对幼苗净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)的影响

由图 3 可知,高温干旱复合胁迫对屋顶绿化

植物幼苗光合作用造成明显影响,显著降低叶片净光合速率和气孔导度。与对照相比,金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花幼苗叶片净光合速率分别显著降低 22.36%、34.19%、17.52%、41.22%、19.97% 和 16.62%;高温干旱复合胁迫条件下,6 种屋顶绿化植物的气孔导度分别降低 25.59%、36.85%、20.80%、43.83%、20.38% 和 17.04%。

2.4 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗 MDA 含量和相对电导率的影响

由图 4 可知,高温干旱复合胁迫可对屋顶绿化植物幼苗造成一定的氧化损伤,幼苗叶片 MDA 含量和相对电导率显著提升。与对照相比,金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草

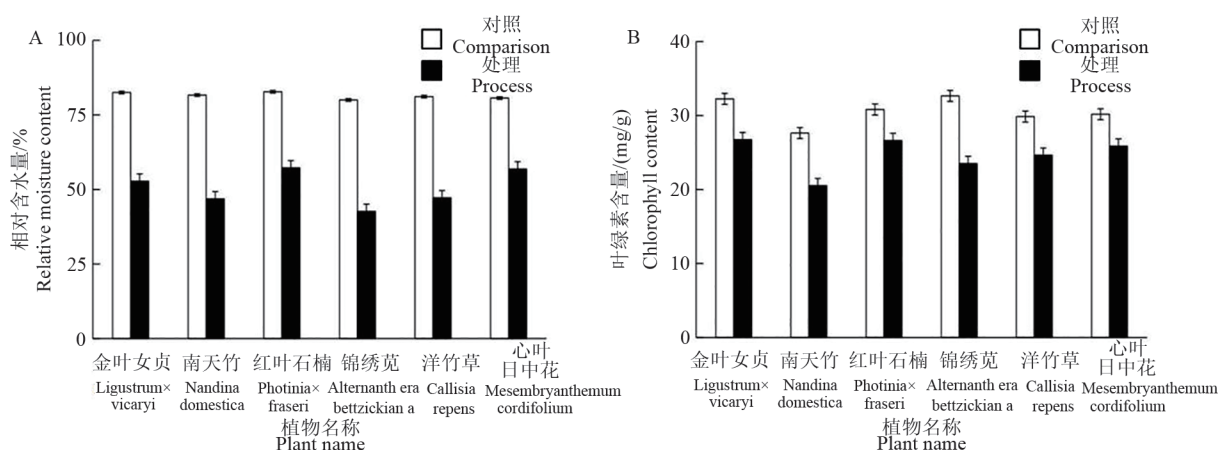


图 2 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗叶片相对含水量及叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of combined high temperature and drought stresses on relative leaf water content and chlorophyll content in seedlings of six rooftop greening plants

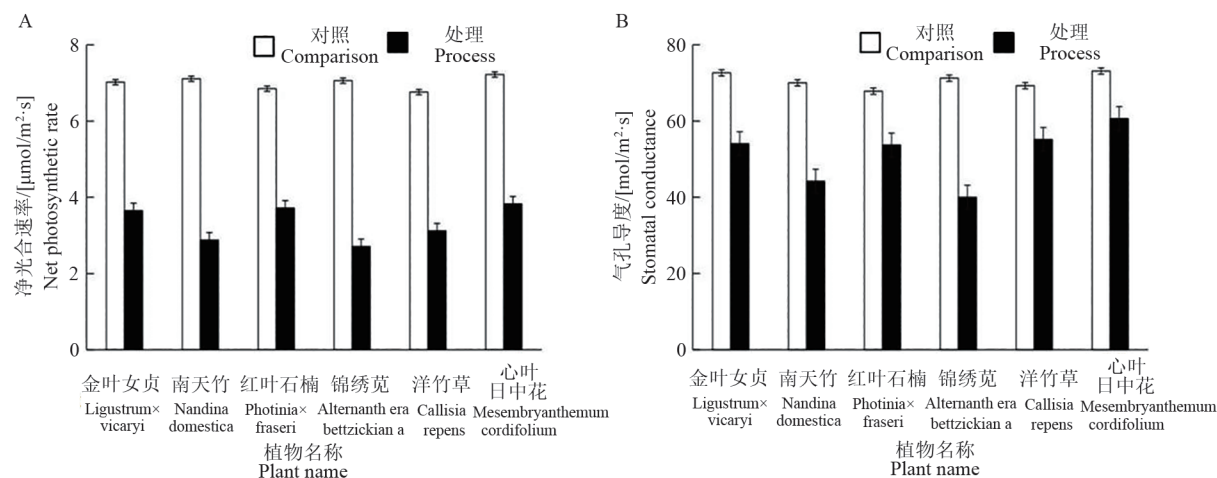
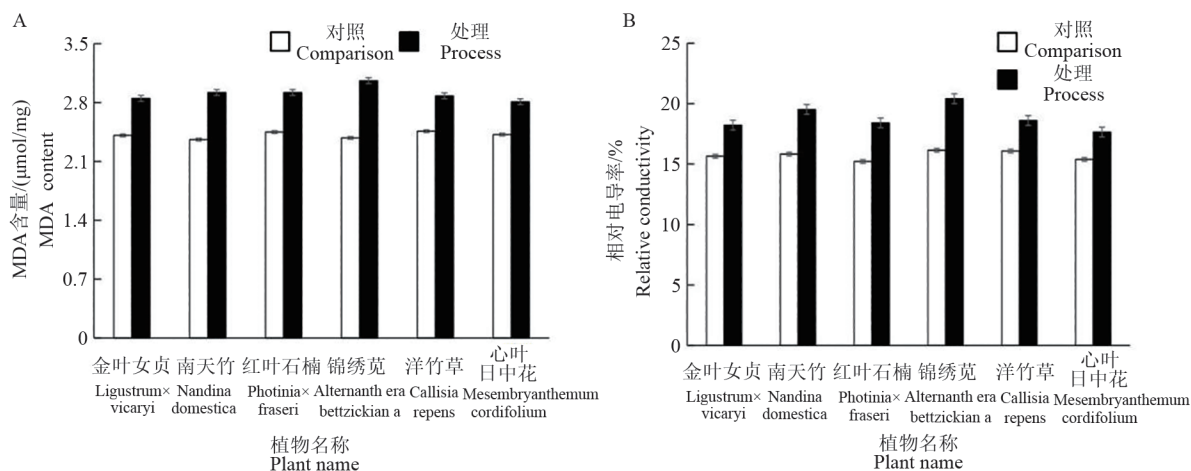
图 3 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗叶片净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)的影响Fig.3 Effects of combined high temperature and drought stresses on net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) of six rooftop greening plant seedlings

图 4 高温干旱复合胁迫对 6 种屋顶绿化植物幼苗叶片 MDA 含量和相对电导率的影响

Fig.4 Effects of combined high temperature and drought stresses on MDA content and relative electrical conductivity in leaves of six rooftop greening plant seedlings

和心叶日中花幼苗叶片MDA含量分别提高18.26%、23.73%、19.18%、28.57%、17.07%和16.12%;6种植物幼苗叶片的相对电导率则分别显著提升16.42%、23.31%、20.96%、26.38%、15.73%和14.68%。

2.5 高温干旱复合胁迫对6种屋顶绿化植物幼苗抗氧化酶活性的影响

由图5可知,高温干旱复合胁迫可显著提升

屋顶绿化植物幼苗叶片的抗氧化酶活性,且提升幅度因物种不同而存在明显差异。金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花幼苗叶片SOD活性分别较对照提升71.13%、30.66%、40.61%、18.79%、64.90%和80.93%;与对照相比,6种植物幼苗的POD活性分别显著提升55.66%、25.42%、42.92%、19.50%、63.30%和75.35%,而CAT活性则分别显著提升60.53%、30.43%、44.50%、24.41%、58.37%和69.41%。

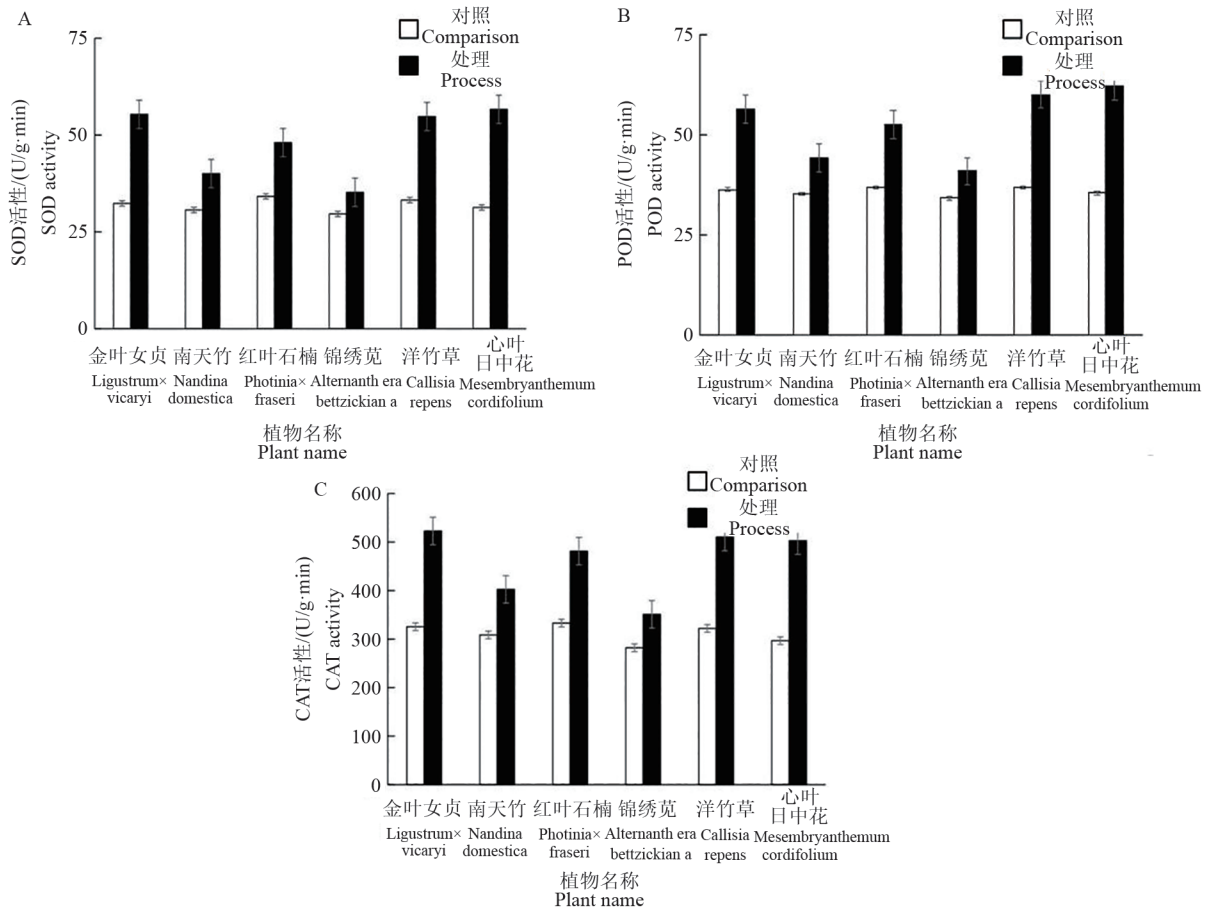


图5 高温干旱复合胁迫对6种屋顶绿化植物幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of combined high temperature and drought stresses on antioxidant enzyme activities in leaves of six rooftop greening plant seedlings

2.6 6种屋顶绿化植物幼苗对高温干旱复合胁迫适应性的综合评价

为准确评价6种屋顶绿化植物对高温干旱复合胁迫的适应性,本研究采用隶属函数法对多个性状进行综合判定,从而对不同品种做准确、全面的评价。同时,为进一步明确不同植物在各指标上的差异显著性,进行了单因素方差分析。由表1可知,在分析过程中,对各植物在高温干

旱胁迫下各指标的具体数值运用隶属函数法进行处理,进而得到平均隶属函数值。单因素方差分析结果显示,在不同指标上,6种植物之间存在不同程度的显著差异。例如在株高指标上,不同植物间的差异达到显著水平($P<0.05$),表明高温干旱复合胁迫对不同植物株高的影响具有明显区别;在整株干重、叶片相对含水量等指标上,同样呈现出显著的植物间差异($P<0.05$),说明各

表 1 6 种屋顶绿化植物在高温干旱胁迫下的隶属函数值及单因素方差分析结果

Table 1 Membership function values and one-way analysis of variance results of six rooftop greening plants under high temperature and drought stress

指标 Indicator	金叶女贞 Ligustrum × vicaryi	南天竹 Nandina domestica	红叶石楠 Photinia × fraseri	锦绣苋 Alternanthera bettzickiana	洋竹草 Callisia repens	心叶日中花 Mesembryanthemum cordifolium	P 值 P value
株高 Plant height	0.61	0.33	1.00	0.00	0.47	0.75	<0.05
整株干重 Whole-plant dry weight	0.63	0.21	1.00	0.00	0.37	0.75	<0.05
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.62	0.24	0.92	0.00	0.28	1.00	<0.05
叶绿素 Chlorophyll content	0.76	0.16	1.00	0.00	0.73	0.95	<0.05
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	0.77	0.29	0.96	0.00	0.86	1.00	<0.05
气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	0.68	0.26	0.86	0.00	0.88	1.00	<0.05
MDA	0.83	0.39	0.75	0.00	0.92	1.00	<0.05
相对电导率 Relative electrical conductivity	0.85	0.26	0.46	0.00	0.91	1.00	<0.05
SOD	0.84	0.19	0.35	0.00	0.74	1.00	<0.05
POD	0.65	0.11	0.42	0.00	0.78	1.00	<0.05
CAT	0.80	0.13	0.45	0.00	0.75	1.00	<0.05
平均隶属函数值 Average membership function value	0.73	0.23	0.74	0.00	0.70	0.95	-
排序 Rank	3	5	2	6	4	1	-

植物在应对高温干旱复合胁迫时,在干重积累、水分保持等方面表现各异。金叶女贞、南天竹、红叶石楠、锦绣苋、洋竹草和心叶日中花的平均隶属函数值分别为 0.73、0.23、0.74、0.00、0.70 和 0.95。因此,6 种屋顶绿化植物对高温干旱复合胁迫的适应性由强到弱依次为心叶日中花>红叶石楠>金叶女贞>洋竹草>南天竹>锦绣苋。

此外,为验证隶属函数评价的合理性,本研究对高温干旱胁迫下的 10 项生理生态指标进行相关性分析。由表 2 分析可知,净光合速率与气孔导度相关系数为 0.89,呈极显著正相关,气孔开度增大利于二氧化碳进入叶片为光合作用提供原料,从而促使净光合速率提高;净光合速率与 MDA 含量相关系数为 -0.72,呈极显著负相关,MDA 含量增加反映植物受逆境胁迫程度加深、细胞膜结构受损,可能影响光合作用相

关酶活性和物质运输进而抑制光合作用;净光合速率与叶片相对含水量相关系数为 0.85,呈极显著正相关,充足水分是光合作用正常进行的必要条件,叶片相对含水量高有利于净光合速率提高;气孔导度与 MDA 含量相关系数为 -0.68,呈极显著负相关,植物受逆境胁迫加重时,会通过调节气孔开度减少水分散失,所以气孔导度随 MDA 含量增加而减小;气孔导度与叶片相对含水量相关系数为 0.81,呈极显著正相关,叶片相对含水量高时气孔开度大利于气体交换,降低时植物会关闭气孔导致气孔导度下降;MDA 含量与叶片相对含水量相关系数为 -0.91,呈极显著负相关,植物受逆境胁迫时细胞膜结构被破坏使 MDA 含量上升,同时水分散失加剧致叶片相对含水量下降,故两者呈现强烈负相关关系。

表 2 指标间 Pearson 相关系数矩阵
Table 2 Pearson correlation coefficient matrix among indicators

指标 Indicator	净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	MDA 含量 MDA content	叶片相对含水量 Leaf relative water content
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	1.00	0.89**	-0.72**	0.85**
气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	0.89**	1.00	-0.68**	0.81**
MDA 含量 MDA content	-0.72**	-0.68**	1.00	-0.91**
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.85**	0.81**	-0.91**	1.00

注:**表示 $P<0.01$, 显著相关。
Note: ** represents $P<0.01$, indicating a significant correlation.

3 讨论与结论

建筑屋顶夏季环境高温、干燥,热胁迫和干旱胁迫作为影响屋顶绿化植物生长发育的主要环境因子,且二者常同时发生^[14]。大量研究表明,高温、干旱复合胁迫具有叠加效应,对植物造成的负面影响往往大于单一因素之和,且植物对复合胁迫的响应通常更显著于单一因素胁迫^[15]。因此,本研究通过模拟屋顶极端环境,揭示了 6 种绿化植物对高温干旱复合胁迫的响应存在显著差异,这反映了它们各自不同的耐受策略和适应能力。

首先,高温干旱胁迫对植物的生长和光合作用产生了普遍抑制作用。所有供试植物的株高、生物量、净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)均显著下降,这与多数研究结果一致^[16-18]。这种下降主要是胁迫导致气孔关闭以减少水分散失,同时也可能直接损伤光合机构^[19]。然而,不同物种的下降幅度各异,例如心叶日中花(*Mesembryanthemum cordifolium*)和红叶石楠(*Photinia×fraseri*)的 P_n 和 G_s 降幅相对较小,表明它们通过维持一定程度的光合作用和水分利用效率,在胁迫下保持了相对较好的生长态势。

更为重要的是,植物在细胞水平上对胁迫的响应机制揭示了其耐受性的关键。丙二醛(MDA)含量和相对电导率的升高是膜脂过氧化和细胞膜损伤的直接标志^[20]。本研究中,锦绣苋(*Alternanthera bettzickiana*)的 MDA 含量和相对电导率上升幅度最大,表明其细胞膜受损最为严重,这是其耐受性差的主要原因。反之,心叶日

中花的这两个指标上升幅度最小,说明其细胞膜系统在胁迫下保持了较高的稳定性。

这种膜稳定性的差异与植物的抗氧化能力密切相关。超氧化物歧化酶(SOD)是清除超氧自由基的关键酶。在胁迫下,心叶日中花的 SOD 活性提升了 80.93%,增幅远高于其他物种,这体现了其高效的活性氧清除能力,从而有效减轻了膜脂过氧化程度。与之形成鲜明对比的是,锦绣苋的 SOD 活性仅提升 18.79%,其脆弱的抗氧化防御系统无法应对胁迫下激增的活性氧,导致严重的氧化损伤。金叶女贞(*Ligustrum×vicaryi*)和锦竹草(*Callisia repens*)则表现出中等的抗氧化酶激活水平,显示它们具备一定的氧化胁迫抵御能力,但不如心叶日中花全面和高效。

综上所述,隶属函数法的评价结果(心叶日中花>红叶石楠>金叶女贞>洋竹草>南天竹>锦绣苋)固然提供了一个直观的耐受性排序,但本研究更深层的价值在于揭示了不同植物应对胁迫的生理策略差异。例如:

(1)心叶日中花通过极强的抗氧化酶激活能力与卓越的膜稳定性,表现出最强的综合耐受性。

(2)红叶石楠和金叶女贞作为木本植物,可能结合了气孔调节、渗透调节及中等强度的抗氧化保护等多种策略,展现出稳健的耐受特性。

(3)锦绣苋则因抗氧化能力不足且膜系统易受损,对高温干旱环境最为敏感。

因此,在屋顶绿化的植物选择中,不应仅依赖于单一的排序结果,而应综合考虑植物的生理适应策略、生长型及景观需求。本研究通过解析

不同植物在高温干旱复合胁迫下的生理响应机制,为针对性地筛选和推广应用适宜的屋顶绿化植物提供了重要的理论依据和实践指导。

参考文献

- [1] 杨 壹,刘建军,孙继斌.5种屋顶绿化常绿植物的耐热性研究[J].西北林学院学报,2021,36(05):233-237.
- [2] 单 进,戴子云.北京常用草坪式屋顶绿化轻型基质对屋面雨水径流控制影响研究[J].北方园艺,2019(20):86-91.
- [3] Shao J,Yao W,Luo L,et al.A sustainable development perspective on urban-scale roof greening priorities and benefits[J]. arXiv Preprint arXiv: 2404.13692, 2024.
- [4] Wang Y,Kong F,Yin H,et al. Identifying the right building roofs for greening from the perspective of socio-ecological demands in a 3D urban landscape [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2023, 19 (03):351-362.
- [5] Pappa V,Bouris D,Theurer W,et al. A wind tunnel study of aerodynamic effects of façade and roof greening on air exchange from a cubic building[J]. Building and Environment,2023,231:110023.
- [6] 胡 锐,陈睿智.成都自生草本植物屋顶绿化夏季气候适应性研究[J].风景园林,2024,31(04):104-110.
- [7] 杨建峰,唐 凌,黎宝宁,等.华南地区3种屋顶绿化植物的适应性和降温效果研究[J].生态科学,2025,44(01):119-126.
- [8] 曾 红,温庚金,罗旭荣,等.4种轻型屋顶绿化植物抗旱能力的综合评价[J].草业科学,2016,33(06):1084-1093.
- [9] 胡玉咏,刘 露,刘一明,等.四种屋顶绿化候选植物的耐热性研究[J].上海交通大学学报(农业科学版),2009,27(03):210-214.
- [10] 杨 壹,刘建军.屋顶绿化5种常绿植物的抗旱性研究[J].西北林学院学报,2020,35(01):73-79.
- [11] 杨建峰,丁 杰,梁湖清,等.屋顶绿化植物铺地锦花草和佛甲草的耐热和抗旱性比较[J].草业科学,2023,40(01):162-168.
- [12] Wang L J,Liao S H,Huang S B, et al. Increasing concurrent drought and heat during the summer maize season in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(7): 3177-3190.
- [13] Zandalinas S I, Mittler R, Balfagón D, et al. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures[J]. Physiologia Plantarum, 2018, 162(1): 2-12.
- [14] 袁淑娜,潘 剑,黄坚雄,等.遮光对五指毛桃植株生物量分配及营养成分组成特征的影响[J].热带作物学报,2024,45(08):1641-1650.
- [15] 陈俊华,刘一丁,蒋川东,等.川中丘陵区火棘生物量模型及生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2025,40(02):84-92+102.
- [16] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等.花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量的影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
- [17] 邵靖宜,李小凡,于维祯,等.高温干旱复合胁迫对夏玉米产量和茎秆显微结构的影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3623-3631.
- [18] 叶 波,吴永波,邵 维,等.高温干旱复合胁迫及复水对构树(*Broussonetia papyrifera*)幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].生态学杂志,2014,33(09):2343-2349.
- [19] 张燕红,吴永波,刘 璇,等.高温和干旱胁迫对杨树幼苗光合性能和抗氧化酶系统的影响[J].东北林业大学学报,2017, 45(11):32-38.
- [20] 吴永波,叶 波.高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J].生态学报,2016, 36(02):403-410.