

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.009

引用格式:高才龙,林俊楠,李州.12份马蹄金材料坪用性能评价及低温耐受性差异研究[J].草地学报,2026,34(4):1229—1241

GAO Cai-long, LIN Jun-nan, LI Zhou. Evaluation of Turf Performance and Difference in Low-temperature Tolerance of 12 *Dichondra repens* Materials[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1229—1241

## 12份马蹄金材料坪用性能评价及低温耐受性差异研究

高才龙<sup>#</sup>, 林俊楠<sup>#</sup>, 李 州<sup>\*</sup>

(四川农业大学草业科技学院, 四川 成都 611130)

**摘要:**马蹄金(*Dichondra repens*)是一种旋花科的暖季型草坪地被植物,广泛应用于园林绿化、水土保持及果园生草,低温胁迫是限制其推广利用的主要因素。本试验以9份西南地区野生马蹄金、两份国审马蹄金新品种以及1份广泛使用的引进品种为材料,综合评价了12份马蹄金材料的田间坪用性状与低温适应能力。研究结果表明,12份马蹄金材料在叶面积、均一性、叶色、绿期长度、草层高度和成坪速度上存在显著差异。坪用性状隶属函数综合分析显示,野生材料Dr5具有成坪速度较快、草层低矮、叶色深绿、均一性高及绿期最长等优点,坪用景观价值较高,而Dr17坪用性能最差。在连续两年的田间低温胁迫下,12份马蹄金的叶绿素含量和叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ )显著下降,而电解质渗透率和丙二醛含量均呈现不同程度的增加趋势。但低温胁迫下Dr5具有最低的半致死温度,较低的电解质渗透率和丙二醛含量,同时维持了较高的叶绿素含量、 $F_v/F_m$ 和 $PI_{ABS}$ ,表现出显著的细胞膜氧化伤害及良好的细胞膜稳定性与光合性能。采用两年耐寒性指标进行隶属函数法综合分析发现,12个马蹄金材料抗寒能力由强到弱依次为 $Dr5 > Dr21 > Dr1 > Dr32 > Dr2 > Dr33 > Dr30 > Dr3 > Dr4 > Dr15 > Dr11 > Dr17$ ,其中Dr5耐寒性最强,Dr17耐寒性最弱。Dr5兼具坪用性能好且耐寒性强的优点,可作为园林绿化应用的优选种质,为培育耐寒型暖季型马蹄金新品种提供了关键材料,也为进一步深入研究不同基因型马蹄金的低温适应机制奠定了基础。

**关键词:**低温半致死温度;光化学效率;马蹄金;坪用性能;细胞膜稳定性

中图分类号:S332.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1229-13

### Evaluation of Turf Performance and Difference in Low-temperature Tolerance of 12 *Dichondra repens* Materials

GAO Cai-long<sup>#</sup>, LIN Jun-nan<sup>#</sup>, LI Zhou<sup>\*</sup>

(College of Grassland Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China)

**Abstract:** *Dichondra repens* is a warm-season perennial ground cover plant belonging to the Convolvulaceae, which is widely utilized in landscaping, soil and water conservation, and orchard ground cover. Low-temperature stress is a main limiting factor restricting its promotion and utilization. In this study, we evaluated turf performance and cold adaptability of 12 dichondra genotypes, including nine wild materials which were collected from Southwest China, two nationally certified cultivars, and one widely-used introduced cultivar. The results found significant variations in leaf area, uniformity, leaf color, green period, canopy height, and establishment rate among the 12 genotypes. A comprehensive evaluation of turf performance by using the subordinate function values analysis indicated that the wild Dr5 exhibited superior characteristics including fast

收稿日期:2025-06-11;修回日期:2025-10-28

基金项目:四川农业大学双支计划资助

作者简介:高才龙(2002-),男,汉族,山西祁县人,硕士研究生,主要研究方向为草育种与抗逆机理, E-mail:1920654772@qq.com;林俊楠(1999-),男,汉族,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为草育种与抗逆机理, E-mail:604364577@qq.com;\*通信作者 Author for correspondence, E-mail:lizhou1986814@163.com

establishment, short canopy height, dark green leaf color, high uniformity, and the longest green period, demonstrating high lawnscape value. In contrast, wild Dr17 showed the poorest turf performance. Under consecutive two-year low-temperature stress, all genotypes showed significant declines in chlorophyll content and fluorescence parameters (Fv/Fm and  $PI_{ABS}$ ), but electrolyte leakage and malondialdehyde content exhibited varying degrees of increase. Notably, Dr5 demonstrated the lowest semilethal temperature, lower EL and MDA content, and higher chlorophyll content, Fv/Fm, and  $PI_{ABS}$ . These findings indicated that Dr5 had significantly lower oxidative damage to cell membrane, enhanced membrane stability, and superior photosynthetic performance under cold stress. Based on a comprehensive evaluation of cold tolerance using the subordinate function values analysis over two years, cold tolerance of 12 genotypes was ranked in descending order as follows: Dr5 > Dr21 > Dr1 > Dr32 > Dr2 > Dr33 > Dr30 > Dr3 > Dr4 > Dr15 > Dr11 > Dr17. Dr5 exhibited the strongest cold resistance, and Dr17 had the weakest cold tolerance. Given its excellent turf quality and exceptional cold tolerance, Dr5 could be used as a superior germplasm for landscaping and a key candidate for breeding cold-tolerant dichondra cultivars. These findings also lay a foundation for further research into the low-temperature adaptation mechanism of different dichondra genotypes.

**Key words:** LTLow-temperature semilethal temperature; Photochemical efficiency; *Dichondra repens*; Turf performance; Cell membrane stability

低温是影响作物正常生长发育以及其品质的重要环境胁迫因素之一,也极大地限制了暖季型草坪地被植物的推广利用<sup>[1-2]</sup>。因此,筛选并培育具有高耐寒能力的草坪地被植物品种,是推进城市生态文明建设的重要基础<sup>[3]</sup>。马蹄金(*Dichondra repens*),又称黄胆草、小金钱草、小马蹄草、九连环等,是一种旋花科多年生草本植物,具有低矮的生长形态、发达的根茎系统及紧凑的生长习性等特性,且成坪后无需修剪,管理成本低廉,使得马蹄金成为一种优质的观赏性暖季型草坪地被植物,广泛运用于城乡园林绿化、故土护坡和果园生草<sup>[4-5]</sup>。国外已选育出许多优良的马蹄金商品种,包括绿瀑(Emerald-falls)、银瀑(Silver-falls)、普通(Common)<sup>[6]</sup>。我国西南地区野生马蹄金群落分布广泛,由于地形、地势及气候的多样性,这些群落在形态和遗传上表现出丰富的变异,为选育能够适应复杂环境变化的优良乡土马蹄金新品种提供了宝贵资源<sup>[7-8]</sup>。目前我国已从西南地区丰富的野生马蹄金资源中成功选育出小哨马蹄金和都柳江马蹄金两个国审新品种<sup>[6,9]</sup>。此外,Lin等<sup>[10]</sup>从西南地区收集了33份马蹄金种质资源,并用分子标记评估了它们的遗传多样性和抗旱性,筛选出最耐旱的马蹄金材料Dr5,但不同马蹄金种质资源之间的抗寒性差异仍有待进一步研究。马蹄金的最适生长温度在20℃左右,越冬困难,冬季低温胁迫下容易出现早枯、生长不良等现象,降低草坪的观赏和使用价值<sup>[11]</sup>。因此,研究马蹄金对低温胁迫的适应性并筛选出具有高耐寒能力的品种,成为我国马蹄金推广应用中亟待解决的重要难题。

低温胁迫主要分为冷胁迫(0~15℃)和冻胁迫

(低于0℃)两种类型,会导致植物叶片黄化、生长停滞甚至死亡,严重限制了暖季型草种在温带及高海拔地区的应用<sup>[12-13]</sup>。在长期的进化过程中,植物通过体内一系列生理生化的代谢及胞内低温相关基因的表达和调控,在植物组织、细胞、生理和分子等多方面形成保护措施,从而抵御低温带来的伤害<sup>[14]</sup>。因此,近年来许多研究采用相对电解质渗透率、丙二醛、可溶性糖以及抗氧化酶活性等生理生化指标来评估不同材料间的耐寒性<sup>[15-16]</sup>。此外,在低温条件下,叶绿素降解速率加快,新的叶绿素合成受阻,这不仅影响了光合作用的效率,还会导致光合器官的结构和功能受损,从而阻碍植物的生长和发育<sup>[17-18]</sup>。耐寒品种在低温条件下相比于冷敏感品种往往能维持更高的叶绿素含量<sup>[19]</sup>。不同耐冷性的植物在低温胁迫下也会展现出不同的光化学效率<sup>[20]</sup>,例如通过对冬小麦(*Triticum aestivum*)不同品种的叶绿素荧光和冻害恢复能力的研究,可以有效区分冷敏感和耐冷品种<sup>[21]</sup>。

目前,马蹄金对低温胁迫的响应机制研究尚处于初始阶段,筛选出生产性能优良的耐寒型马蹄金,并培育优良耐寒马蹄金新品种对推动马蹄金的应用具有重要意义<sup>[22]</sup>。本试验通过观测田间条件下12个不同来源马蹄金材料的坪用性状,包括叶色、绿期、均一性、成坪速度、叶片形态以及叶层自然高度的差异,并且通过测定半致死温度、电解质渗透率、丙二醛含量、叶绿素含量及光化学效率系统评估低温胁迫下不同材料间的抗寒能力强弱。研究结果为筛选坪用性能好且耐寒性强的马蹄金材料提供了科学依据,也为培育优良耐寒马蹄金新品种提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取国内外 12 个不同来源马蹄金作为试验材料,其中包括 9 个野生材料、2 个国审新品种和 1 个国外商品种(表 1)。

表 1 供试材料  
Table 1 Test materials

| 材料编号<br>Material number | 材料类型<br>Material type | 产地<br>Place of origin | 生境<br>Habitat | 海拔<br>Altitude/m |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|------------------|
| Dr1                     | 野生材料                  | 四川省中江县                | 田坎上           | 600              |
| Dr2                     | 野生材料                  | 贵州省平塘县                | 山坡上           | 848              |
| Dr3                     | 野生材料                  | 贵州省独山县                | 马路边           | 1010             |
| Dr4                     | 野生材料                  | 贵州省天柱县                | 河边            | 350              |
| Dr5                     | 野生材料                  | 四川省纳溪县                | 鱼塘边           | 404              |
| Dr11                    | 野生材料                  | 贵州省思南县                | 小河边           | 730              |
| Dr15                    | 野生材料                  | 贵州省丹寨县                | 坡上            | 894              |
| Dr17                    | 野生材料                  | 贵州省三都县                | 田边            | 780              |
| Dr21                    | 野生材料                  | 贵州省镇宁县                | 田边            | 1278             |
| Dr33(都柳江)               | 国审新品种                 | 贵州省三都县                | 路边            | 600              |
| Dr32(小哨)                | 国审新品种                 | 云南省宜良县                | 路边            | 1970             |
| Dr30(银瀑)                | 国外品种                  | 美国                    | /             | /                |

1.2 试验设计

12 份马蹄金材料坪用性状以及抗寒性评价于

2022 年 5 月开始,在四川省崇州市四川农业大学现代研发基地进行。2021 年 10 月在四川农业大学成都校区温室大棚对 12 份马蹄金材料进行扩繁,每份材料使用草皮块(4 cm×4 cm)种植于含河沙和土(比例为 1:1)的白色景观盆(高 16.7 cm,直径 21.5 cm)中,每份材料扩繁 4 个重复。待材料在盆中成坪后于 2022 年 5 月份进行田间移栽,移栽时使用前期扩繁的材料一个小区一盆,每份材料 4 个重复(4 个小区)。采用随机区组排列设计,每个小区大小为 2×2 m,共 48 个小区,每个小区间有宽度为 50 cm 的横沟作为过道,避免相互混杂。试验时间为 2022 年 05 月开始至 2023 年 12 月结束。图 1 为试验地 2022 年和 2023 年试验期间的最高、最低和平均气温变化,2022 年试验期间最低气温-1.7℃,其中低于 15℃的天数为 53 d,最高气温 27.5℃,平均气温 12.5℃;2023 年试验期间最低气温-2.6℃,其中低于 15℃的天数为 51 d,最高气温 25.6℃,平均气温 12.6℃。成坪速度从开始将材料移栽至田间开始计算。2022 年低温胁迫取样时间分别是 10 月 4 日、11 月 15 日、12 月 10 日,2023 年取样时间分别是 10 月 4 日、11 月 15 日、12 月 16 日,测定叶片叶绿素含量、叶绿素荧光参数、相对电解质渗透率、丙二醛含量以及半致死温度。

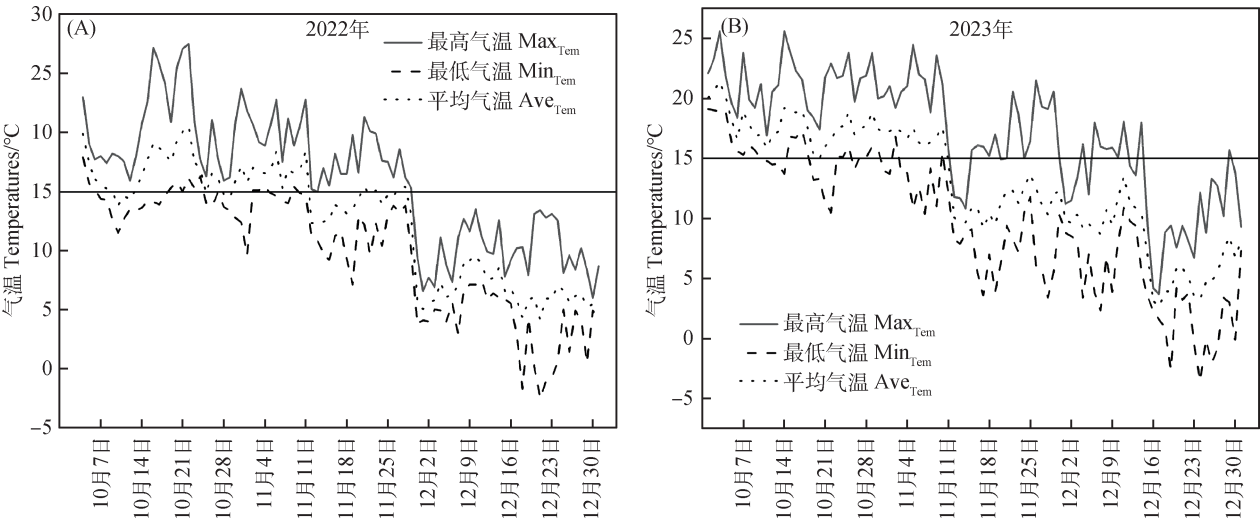


图 1 试验地(A)2022 年(B)2023 年试验期间的最高、最低和平均气温变化  
Fig. 1 Changes in maximum, minimum, and mean temperature in (A) 2022 (B) 2023

1.2 指标测定

1.2.1 成坪速度和绿期测定

(1)成坪速度

成坪速度反映了材料的适应性和生长能力,指从建坪到草坪盖度达到 85% 的天数,使用目测法对

马蹄金材料进行成坪速度打分。

(2)绿期测定

绿期是指从草坪返青之日到呈现枯黄之日的持续天数,采用目测打分。评分标准见表 2。

### 1.2.2 形态指标测定

#### (1) 草层自然高度与叶面积

草层自然高度用直尺测量,每个小区随机测定5个点,然后求平均值。测定叶面积按圆形面积测定,使用游标卡尺测量叶长和叶宽,再通过公式  $S = \pi r [(长 + 宽)/4]^2$  近似算得其大小,每个小区随机测定10片成熟叶片,然后求平均值。

#### (2) 叶柄长度和叶片厚度

叶柄长度使用游标卡尺测量叶片与茎的连接部位长度,每个小区随机选取10片成熟叶片测定后

求平均值。叶片厚度使用游标卡尺对随机选取的10枚叶片进行测量并求平均值。

**1.2.3 坪用性能综合评分** 马蹄金的坪用性能综合评价参考费凌等人提出的方法进行测定<sup>[23-24]</sup>。鉴于实际生产应用,本评定以叶面积、均一性、叶色、绿色期和草层高度等基本指标为依据,并考虑了草坪的成坪速度,以此综合评估马蹄金草坪的性能。评分采用9分制,9分为最高,1分为最低。其中权重为0.2的为均一性与叶色,权重为0.15的为成坪速度、绿期、草层高度与叶面积(表2)。

表2 马蹄金草坪坪用性能评分标准

Table 2 Evaluation standards for turf performance of *Dichondra repens*

| 指标<br>Indicator                   | 评分 Scoring/分 |                 |                 |                 |         |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
|                                   | 1—2          | 3—4             | 5—6             | 7—8             | 9       |
| 叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>     | <0.2或>2      | 0.2—0.4或1.5—2.0 | 0.4—0.6或1.2—1.5 | 0.6—0.8或1.0—1.2 | 0.8—1.0 |
| 均一性 Uniformity                    | 十分杂乱         | 不均一             | 基本均一            | 整齐              | 很整齐     |
| 叶色 Leaf color                     | 黄绿           | 浅绿/灰绿           | 中绿              | 深绿              | 蓝绿      |
| 绿期 Green period/d                 | <280         | 280—290         | 290—300         | 300—310         | >310    |
| 草层自然高度 Natural height of sward/cm | >3           | 2.0—3.0         | 1.0—2.0         | 0.5—1.0         | <0.5    |
| 成坪速度 Turf establishment rate/d    | >170         | 160—170         | 150—160         | 140—150         | <140    |

### 1.2.4 生理指标测定

#### (1) 电解质渗透率

电解质渗透率测定参照 Blum 等<sup>[25]</sup>的方法。称取0.1 g叶片,使叶片完全浸入去离子水中,于25℃放置24 h,用 DDS-11A 型电导仪测其初始电导率(S<sub>1</sub>),然后在高压灭菌锅中105℃蒸15 min,冷却至室温后测终电导率(S<sub>2</sub>)。相对电解质渗透率=(煮前电导率S<sub>1</sub>/煮后电导率S<sub>2</sub>)×100%。

#### (2) 叶绿素含量和荧光参数

采用二甲基亚砜提取法测定叶片叶绿素含量<sup>[26]</sup>。称取0.1 g叶片并剪碎,装入棕色具塞刻度试管中,加入二甲基亚砜5 mL,使叶片完全浸入液体中,加盖后放入暗处至叶片完全变白,取200 μL浸提液,用 UV-2102PC 型紫外分光光度计在645 nm和663 nm波长下测定其吸光值。倾出浸提液,把叶片放入烘箱烘干至恒重称取干重。使用汉莎叶绿素荧光仪 FMS-2 测定叶绿素荧光参数。首先将植物在黑暗中避光30 min,然后用荧光仪读取叶片叶绿素荧光 PSII 原初光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)和光化学健康指数(PI<sub>ABS</sub>)。

#### (3) 丙二醛含量

采用硫代巴比妥酸反应法测定<sup>[27]</sup>。将0.1 g叶片放入3 mL磷酸缓冲液中研磨成匀浆,12 000 g离心20分钟后得到上清液。向0.5 mL的上清液中加

入1 mL的反应液,95℃水浴30分钟,在冰浴上快速冷却至室温。10 000 g下离心10 min,取上清液在532 nm和600 nm处测定吸光值,计算丙二醛含量。

#### (4) 叶片半致死温度

采用电解质渗透率法进行叶片半致死温度(LT<sub>50</sub>)的测定<sup>[28]</sup>。使用 DC-2006 型低温循环仪,设置了5个温度梯度(10℃,5℃,0℃,-5℃,-10℃)。每一温度处理时间为1 h,4次重复。每一低温处理后,加入20 mL去离子水,静置2 h,测定其初始电解质渗透率,然后置于105℃沸水浴20分钟,测其煮后电解质渗透率。根据不同温度下的电解质渗透率拟合 Logistic 方程,将 Logistic 方程进行转换,使用转换后方程求得半致死温度。

#### (5) 隶属函数法综合分析抗寒性

利用胁迫指数来计算电解质渗透率、叶绿素、光化学效率、光化学健康指数、丙二醛5个抗寒指标的隶属度函数,从而量化12份马蹄金材料在田间低温胁迫下的耐受性<sup>[29-30]</sup>。使用田间最后一次取样数据为胁迫数据,第一次取样数据为正常状态数据来进行胁迫指数计算。如果某一指标与马蹄金耐寒性呈正相关,采用以下公式计算隶属函数值:

$$F_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$$

式中: $F_{ij}$ 代表第*i*品种第*j*指标的隶属函数值, $X_{ij}$ 表示该品种该指标的测定值, $X_{imax}$ 和 $X_{imin}$ 分别为

该指标的最大值和最小值。如果某一指标与耐寒性呈负相关,使用以下公式计算隶属函数值:

$$F_{ij}=1-(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$$

1.3 统计分析

使用 Excel 整理并统计数据,SPSS 26 软件进行方差分析,并通过 Tukey’s test 进行单因素方差分析不同处理之间的显著性差异( $P<0.05$ )。采用 Origin 2022 完成作图。

2 结果与分析

2.1 12 份马蹄金材料成坪速度和形态变化

表 3 显示出 12 个马蹄金成坪速度在 4—6 个月,其中 Dr3 和 Dr1 在种植后 140 d 内的成坪率达到 85%,最快形成完整草坪。相较而言,Dr11 成坪最慢,为 205 d,Dr17 和 Dr21 成坪速度第二慢,为 196 d。此外,引进品种 Dr30 的成坪速度也较慢,为 177 d。草坪绿期根据 2022 年与 2023 年材料返青与枯黄时间来确定,材料返青达到 50% 时为绿期开始,当材料枯黄达到 50% 时为绿期结束。在 2022 年,Dr5 和 Dr33 的绿期超过了 300 d,其中 Dr5 的绿期长达 313 d。绿期在 290 至 300 d 的材料包括 Dr1、

Dr2、Dr3、Dr4、Dr21、Dr30 和 Dr32。而 Dr11、Dr15 和 Dr17 这些材料的绿期较短,分别为 275 d、280 d 和 275 d。在 2023 年,各材料的绿期普遍增加,所有材料的绿期均超过 290 d,特别是 Dr3、Dr4 和 Dr32 的绿期超过 300 d,Dr5 的绿期甚至超过 320 d。在两年的观测中,Dr5 均表现出最长的绿期。

在表 4 中可见,12 个马蹄金材料中大多数的草层高度未超过 2 cm,其中 Dr17 的草层高度最低,仅为 1.37 cm。相较之下,Dr3、Dr15、Dr30 和 Dr33 的草层高度超过 2 cm,分别为 2.08、2.07、5.44 和 2.51 cm。草层最高的 Dr30 与最低的 Dr17 高度相差 4 倍。小叶型(叶面积 $\leq 100\text{ mm}^2$ )包括 Dr1、Dr11、Dr17、Dr32;中叶型( $100\text{ mm}^2<$ 叶面积 $<150\text{ mm}^2$ )包括 Dr2、Dr3、Dr5、Dr15、Dr21;大叶型(叶面积 $\geq 150\text{ mm}^2$ )包括 Dr4、Dr30、Dr33。12 份马蹄金可依叶柄长度划分为三个类别:短叶柄类(平均长度小于 24 mm)、中叶柄类(平均长度在 24 至 30mm 之间)和长叶柄类(平均长度超过 30 mm)。其中,短叶柄类包括 Dr1、Dr2、Dr3、Dr5、Dr11、Dr15、Dr17 和 Dr32;中叶柄类有 Dr21 和 Dr33;而长叶柄类则包括 Dr4 和 Dr30。叶片厚度范围从 0.16 至 0.25 mm,其中 Dr30 的叶片最厚,Dr1 的最薄。基于叶面积,这 12 份马蹄金被分为大、中、小三种叶型。

表 3 12 份马蹄金成坪速度和绿期  
Table 3 Turf establishment rate and green period of 12 dichondra materials

| 材料编号 Material number | 移栽日期 Transplanting date | 成坪日期 Turf establishment date | 成坪天数 Turf establishment period/d |
|----------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Dr1                  | 5月4日                    | 9月21日                        | 140                              |
| Dr2                  | 5月4日                    | 9月25日                        | 144                              |
| Dr3                  | 5月4日                    | 9月21日                        | 140                              |
| Dr4                  | 5月4日                    | 10月18日                       | 167                              |
| Dr5                  | 5月4日                    | 10月14日                       | 163                              |
| Dr11                 | 5月4日                    | 11月25日                       | 205                              |
| Dr15                 | 5月4日                    | 10月28日                       | 177                              |
| Dr17                 | 5月4日                    | 11月16日                       | 196                              |
| Dr22                 | 5月4日                    | 11月16日                       | 196                              |
| Dr30                 | 5月4日                    | 10月28日                       | 177                              |
| Dr32                 | 5月4日                    | 9月25日                        | 144                              |
| Dr33                 | 5月4日                    | 9月27日                        | 146                              |

2.2 12 份马蹄金材料的坪用性能综合评价

根据评分标准对 12 份马蹄金的坪用性状进行评分,结合各个指标的权重进行加权计算得到最后的总分,12 份材料在两年的得分结果可见表 5。Dr5 在 2022 年的评价中表现最佳,得分 7.75,特别在绿期和均一性方面得分高。Dr3 也表现出较高的总分(6.9),表明其具有较好的草坪质量。Dr32 在叶面积、均一性和叶色

方面表现良好,总分为 6.85,位列第三。Dr2 和 Dr4 的总分分别为 6.7 和 6.2,居中等位置,表明它们具有一定的优势。而 Dr17 和 Dr21 得分较低,主要在叶色和成坪速度方面得分不高。2022 年 12 份马蹄金材料的坪用性能排序结果为 Dr5>Dr3>Dr32>Dr2>Dr4>Dr1>Dr11=Dr15>Dr33>Dr30>Dr21>Dr17。在 2023 年,Dr5 依然保持最高分(7.75),在所有评价指标

表 4 12 份马蹄金形态指标

Table 4 Morphological parameters of 12 dichondra materials

| 材料编号<br>Material number | 叶柄长<br>Petiole length/mm | 叶片厚度<br>Leaf thickness/mm | 叶长<br>Leaf length/mm | 叶宽<br>Leaf width/mm | 叶面积<br>Leaf area/mm <sup>2</sup> | 草层自然高度<br>Natural height of sward/cm |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Dr1                     | 23.53±3.04               | 0.16±0.04                 | 11.92±1.14           | 9.67±0.80           | 98.29±10.16                      | 1.42±0.12                            |
| Dr2                     | 24.13±2.03               | 0.19±0.05                 | 11.41±0.49           | 10.74±0.85          | 136.09±2.39                      | 1.58±0.15                            |
| Dr3                     | 23.63±2.82               | 0.22±0.03                 | 11.98±1.20           | 10.44±0.74          | 114.16±4.79                      | 2.08±0.36                            |
| Dr4                     | 34.44±3.58               | 0.18±0.03                 | 14.54±0.68           | 11.58±1.06          | 156.91±13.94                     | 1.98±0.23                            |
| Dr5                     | 23.36±1.82               | 0.19±0.03                 | 14.96±0.44           | 14.44±0.41          | 144.67±9.10                      | 1.6±0.22                             |
| Dr11                    | 20.54±1.12               | 0.23±0.05                 | 12.64±0.66           | 9.41±0.41           | 79.11±6.74                       | 1.79±0.19                            |
| Dr15                    | 21.53±1.22               | 0.19±0.04                 | 12.34±1.09           | 10.95±0.60          | 110.4±11.50                      | 2.07±0.35                            |
| Dr17                    | 21.18±1.47               | 0.21±0.03                 | 10.36±0.40           | 9.24±0.78           | 76.23±2.66                       | 1.37±0.13                            |
| Dr21                    | 24.37±2.86               | 0.18±0.03                 | 13.08±1.08           | 12.18±0.34          | 105.16±7.15                      | 1.38±0.17                            |
| Dr30                    | 50.58±4.21               | 0.25±0.04                 | 17.72±0.17           | 17.29±0.51          | 213.23±20.72                     | 5.44±0.22                            |
| Dr32                    | 22.53±2.29               | 0.18±0.03                 | 11.9±0.69            | 10.74±0.29          | 99.72±6.51                       | 1.63±0.15                            |
| Dr33                    | 28.20±2.82               | 0.21±0.07                 | 20.63±1.71           | 17.21±0.29          | 238.94±14.09                     | 2.51±0.25                            |

中都表现出色,尤其是在绿期和均一性上。相较于 Dr5,Dr3 的总分为 7.2,比 2022 年略有上升,保持在前列。Dr32 保持稳定的性能,总分为 7.15,其绿期、叶面积和均一性具有优势。而 Dr17 的总分为 4.9,在两年

中得分均是最低的,特别是在绿期和成坪速度方面表现不佳。2022 年坪用性能由高到底依次为 Dr5>Dr3>Dr32>Dr2>Dr11>Dr4>Dr15>Dr1>Dr33>Dr30>Dr17=Dr21。

表 5 2022 年和 2023 年 12 份马蹄金草坪坪用性能综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of turf performance of 12 dichondra materials in 2022 and 2023

| 材料编号<br>Material number | 叶面积<br>Leaf area |    | 均一性<br>Uniformity |    | 叶色<br>Leaf color |    | 绿期<br>Green period |    | 草层高度<br>Sward height |    | 成坪速度<br>Turf establishment rate |    | 总分<br>Total score |      | 排序<br>Ranking |
|-------------------------|------------------|----|-------------------|----|------------------|----|--------------------|----|----------------------|----|---------------------------------|----|-------------------|------|---------------|
|                         | 22               | 23 | 22                | 23 | 22               | 23 | 22                 | 23 | 22                   | 23 | 22                              | 23 | 22                | 23   |               |
| Dr1                     | 9                | 9  | 8                 | 8  | 4                | 4  | 6                  | 6  | 6                    | 6  | 4                               | 4  | 6.15              | 6.15 | 8             |
| Dr2                     | 6                | 6  | 8                 | 8  | 6                | 6  | 6                  | 6  | 6                    | 6  | 8                               | 8  | 6.70              | 6.70 | 4             |
| Dr3                     | 8                | 8  | 9                 | 9  | 6                | 6  | 6                  | 8  | 4                    | 4  | 8                               | 8  | 6.90              | 7.20 | 2             |
| Dr4                     | 4                | 4  | 8                 | 8  | 8                | 8  | 6                  | 8  | 6                    | 6  | 4                               | 4  | 6.20              | 6.50 | 5             |
| Dr5                     | 6                | 6  | 9                 | 9  | 8                | 8  | 9                  | 9  | 6                    | 6  | 8                               | 8  | 7.75              | 7.75 | 1             |
| Dr11                    | 8                | 8  | 6                 | 6  | 6                | 6  | 2                  | 6  | 6                    | 6  | 8                               | 8  | 6.00              | 6.60 | 6             |
| Dr15                    | 8                | 8  | 8                 | 8  | 4                | 4  | 4                  | 6  | 4                    | 4  | 8                               | 8  | 6.00              | 6.30 | 7             |
| Dr17                    | 8                | 8  | 6                 | 6  | 2                | 2  | 2                  | 6  | 6                    | 6  | 2                               | 2  | 4.30              | 4.90 | 12            |
| Dr21                    | 8                | 8  | 6                 | 6  | 2                | 2  | 6                  | 6  | 6                    | 6  | 2                               | 2  | 4.90              | 4.90 | 11            |
| Dr30                    | 2                | 2  | 8                 | 8  | 8                | 8  | 6                  | 6  | 2                    | 2  | 2                               | 2  | 5.00              | 5.00 | 10            |
| Dr32                    | 9                | 9  | 9                 | 9  | 8                | 8  | 6                  | 8  | 6                    | 6  | 2                               | 2  | 6.85              | 7.15 | 3             |
| Dr33                    | 2                | 2  | 9                 | 9  | 8                | 8  | 8                  | 8  | 4                    | 4  | 2                               | 2  | 5.80              | 5.80 | 9             |

## 2.3 12 份马蹄金材料田间抗寒性评价

**2.3.1 低温胁迫对马蹄金叶片电解质渗透率与丙二醛的影响** 如图 2A 和 B 所示,在两年田间评价期间 12 份马蹄金材料的电解质渗透率随胁迫时间增长而上升。在 2022 年中,12 份材料在胁迫前的电解质渗透率介于 32% 至 46% 之间,而在胁迫末期,电解质渗透率升至 59% 到 69%。胁迫末期,Dr5 仍保持最低的电解质渗透率(59%),而 Dr17 的电解质渗透率最高(69%)。在 2023 年,胁迫前电解质渗透率范围为 34% 至 45%,胁迫末期电解质渗透率增加

至 60% 到 72%(图 2B)。与 2022 年类似,胁迫前电解质渗透率最低和最高的分别是 Dr5 和 Dr2,胁迫末期电解质渗透率最低和最高的分别是 Dr5 和 Dr17。此外,在 2022 年和 2023 年,随着胁迫程度的增加,12 份材料的丙二醛含量均显著上升(图 3A 和 B)。2022 年胁迫期间,Dr5 的丙二醛含量增加最少,而 Dr17 的增加最多(图 3A)。在图 3B 中,2023 年的情况与 2022 年相似,Dr5 的表现最佳,丙二醛在胁迫后上升最少,而 Dr17 的表现最差,胁迫后丙二醛上升最多。

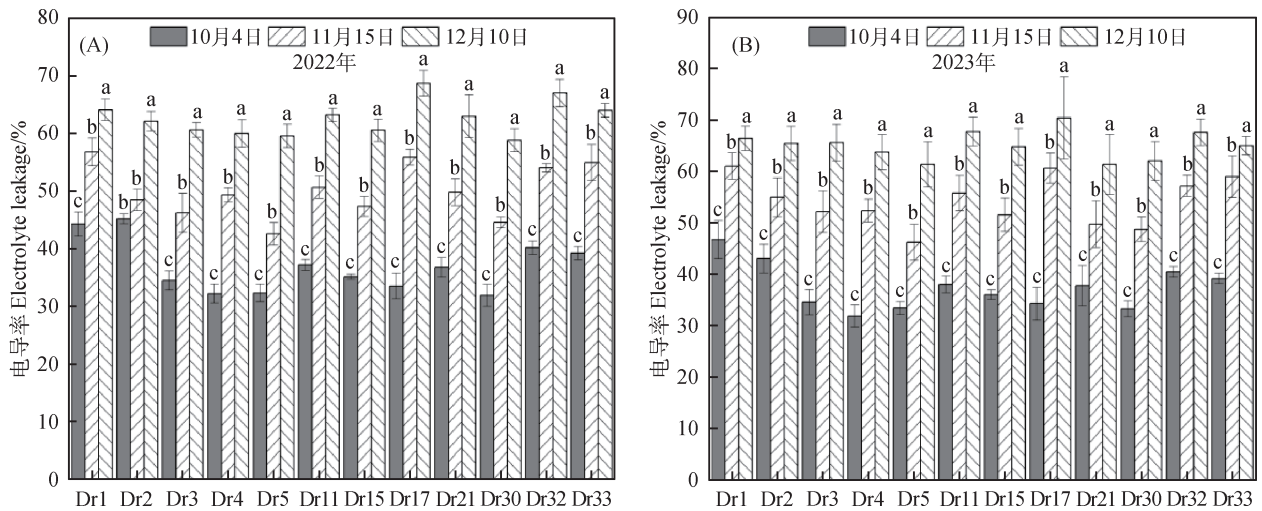


图2 低温胁迫对12份马蹄金(A)2022年(B)2023年电解质渗透率(EL)的影响

Fig. 2 Effect of low-temperature stress on electrolyte leakage (EL) of 12 dichondra materials in (A) 2022 (B) 2023

注:不同字母表示在0.05水平上差异显著( $P < 0.05$ )。下同

Note: Different letters indicated significant differences at  $P < 0.05$  level. The same as below

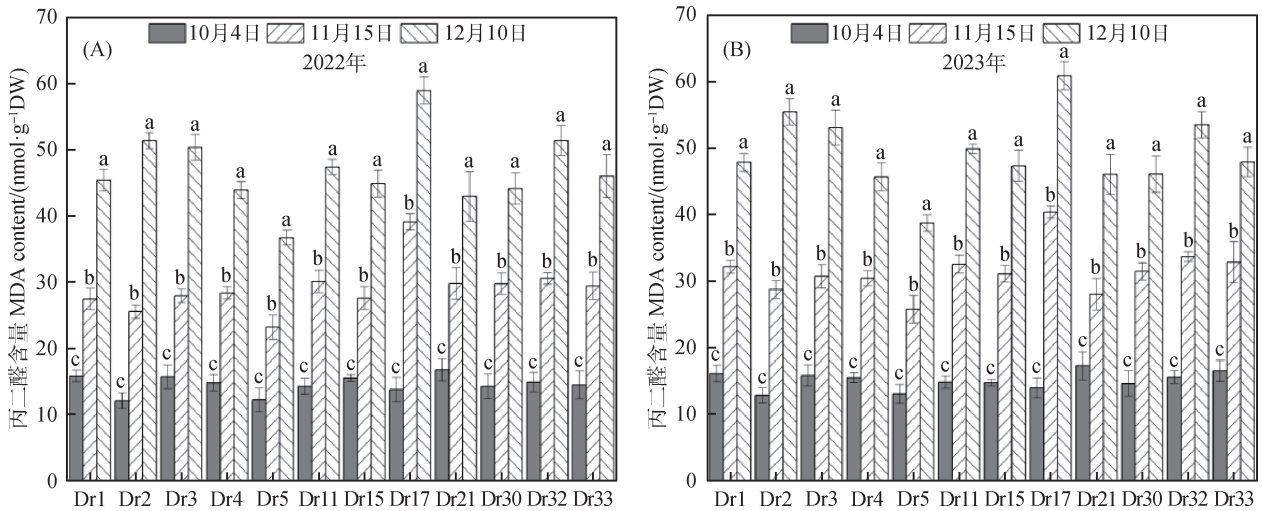


图3 低温胁迫对12份马蹄金(A)2022年(B)2023年丙二醛含量(MDA)的影响

Fig. 3 Effect of low-temperature stress on malondialdehyde (MDA) content of 12 dichondra materials in (A) 2022 (B) 2023

**2.3.2 低温胁迫对马蹄金叶片叶绿素含量及荧光参数的影响** 在田间低温条件下,随胁迫时间的延长12份材料的叶绿素含量都显著下降(图4A和B)。图4A中可以看到,2022年胁迫前12份材料的叶绿素含量在 $8.5$ 至 $11.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,其中Dr2和Dr30的叶绿素含量最高,分别为 $11.6$ 和 $11.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。随着胁迫时间的延长,12份材料的叶绿素含量均有不同程度的降低,在胁迫末期12份材料的叶绿素含量下降到 $3.1$ 至 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。其中Dr5和Dr30的叶绿素含量最高,分别是 $5.2$ 和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,而Dr11和Dr17的叶绿素含量最低均为 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (图4A)。图4B中2023年胁迫前12份材料叶绿素含量最高的也是Dr2和Dr30。胁迫末期叶绿素含

量最高和叶绿素含量最少的材料分别是Dr5和Dr17,与2022年有相同的趋势(图4B)。

在2022年,12份材料胁迫前的Fv/Fm均维持在较高的水平,其中Dr5的最大光化学效率值最高,Dr21的最大光化学效率值最低值(图5A)。胁迫末期12份材料的Fv/Fm均显著降低,其中Dr5在胁迫后维持了最高的Fv/Fm,Dr15在胁迫后Fv/Fm最低(图5A)。2023年胁迫前12份材料的Fv/Fm在 $0.80$ 至 $0.72$ 之间,最高值为Dr5的 $0.80$ ,最低值为Dr17的 $0.72$ (图5B)。胁迫末期Fv/Fm最高值为Dr5的 $0.71$ ,最低值为Dr17的 $0.50$ (图5B)。在2022年中,12份材料胁迫前的PI<sub>ABS</sub>存在较大差异,其中最高值为Dr30,最低值为

Dr1(图6A)。低温胁迫显著降低了12份马蹄金材料的 $PI_{ABS}$ ,但此时Dr30的 $PI_{ABS}$ 最高,而Dr33的 $PI_{ABS}$ 最低(图6A)。图6B显示,2023年胁迫前

Dr30的 $PI_{ABS}$ 最高,Dr1的 $PI_{ABS}$ 最低。胁迫末期Dr30的 $PI_{ABS}$ 仍然最高,而Dr33的 $PI_{ABS}$ 降到最低值(图6B)。

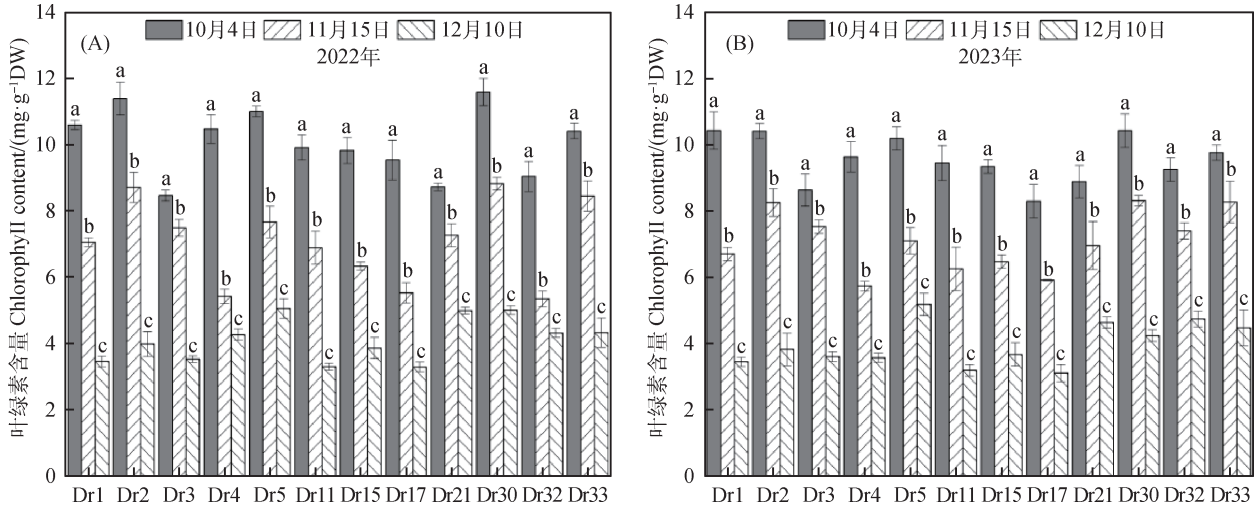


图4 低温胁迫对12份马蹄金(A)2022年(B)2023年叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effect of low-temperature stress on chlorophyll content of 12 dichondra materials in (A) 2022 (B) 2023

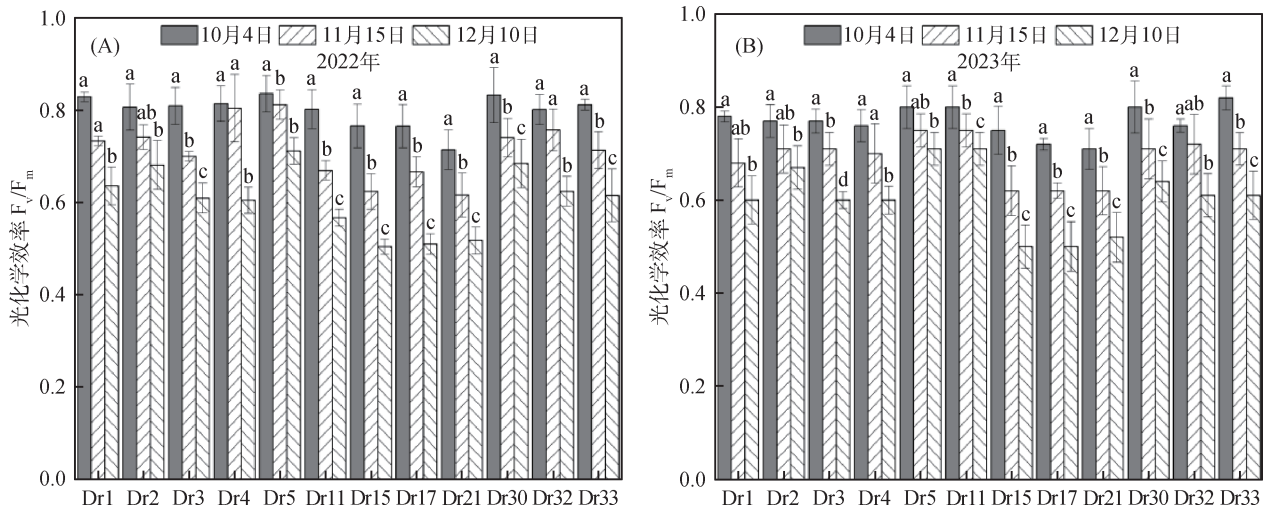


图5 低温胁迫对12份马蹄金(A)2022年(B)2023年PSII原初光能转化效率( $F_v/F_m$ )的影响

Fig. 5 Effect of low-temperature stress on the ratio of variable to maximal fluorescence ( $F_v/F_m$ ) of 12 dichondra materials in (A) 2022 (B) 2023

**2.3.3 12个马蹄金材料半致死温度差异** 半致死温度( $LT_{50}$ )是植物抗寒性研究中最广泛使用的指标之一,可以反映出不同植物物种以及同一物种不同材料之间的抗寒性强弱, $LT_{50}$ 越低的植物其抗寒性越强。从表6中可以看到12份材料的半致死温度为 $-8.75$ 至 $-3.08$ ,其中Dr5的 $LT_{50}$ 最低为 $-8.5^{\circ}\text{C}$ ,Dr17的 $LT_{50}$ 最高为 $-3.08^{\circ}\text{C}$ ,两者半致死温度相差 $5.42^{\circ}\text{C}$ ,说明两者的抗寒性差异显著。12份马蹄金材料的半致死温度排序由低到高分别为 $Dr5 < Dr32 < Dr33 < Dr3 < Dr30 < Dr1 < Dr15 < Dr2 < Dr21 < Dr11 < Dr4 < Dr17$ 。

**2.3.4 田间条件下12个马蹄金材料抗寒性综合评价** 使用隶属函数综合评价12份马蹄金材料抗寒性,并进行排序(表7)。在2022年得到12份材料抗寒性由强到弱依次为 $Dr5 > Dr1 > Dr21 > Dr2 > Dr32 > Dr30 > Dr33 > Dr3 > Dr15 > Dr4 > Dr11 > Dr17$ 。在2023年得到12份材料的抗寒性由强到弱依次排序为 $Dr5 > Dr21 > Dr1 > Dr32 > Dr2 > Dr33 > Dr30 > Dr3 > Dr4 > Dr15 > Dr11 > Dr17$ 。对两年隶属函数得分进行平均再次进行排序,最终抗寒性由强到弱排序结果为 $Dr5 > Dr21 > Dr1 > Dr32 > Dr2 > Dr33 >$

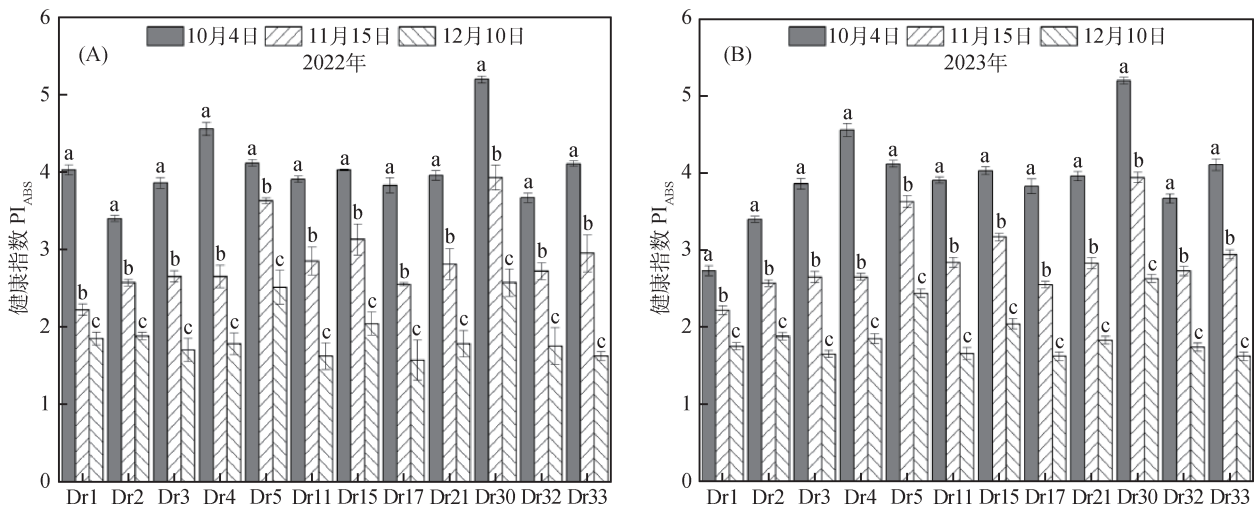


图 6 低温胁迫对 12 份马蹄金(A) 2022 年(B) 2023 年光化学健康指数 (PI<sub>ABS</sub>) 的影响

Fig. 6 Effect of low-temperature stress on performance index on absorption basis (PI<sub>ABS</sub>) of 12 dichondra materials in (A) 2022 (B) 2023

表 6 12 份马蹄金半致死温度

Table 6 Low-temperature semilethal temperature of 12 dichondra materials

| 材料编号<br>Material number | 温度 Temperature |      |      |      |      | 转换方程<br>Conversion equation | LT <sub>50</sub> /℃ | 拟合度 R <sup>2</sup><br>Goodness of fit R <sup>2</sup> | 排序<br>Ranking |
|-------------------------|----------------|------|------|------|------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|---------------|
|                         | 10℃            | 5℃   | 0℃   | -5℃  | -10℃ |                             |                     |                                                      |               |
| Dr1                     | 9.7            | 16.9 | 28.7 | 41.4 | 63.6 | y=0.1365x+0.9046            | -6.63               | 0.9943                                               | 6             |
| Dr2                     | 5.78           | 17.9 | 30.1 | 37.9 | 68.4 | y=0.1631x+0.9757            | -5.98               | 0.964                                                | 8             |
| Dr3                     | 6.78           | 18.9 | 24.1 | 34.9 | 61.4 | y=0.1401x+1.0768            | -7.69               | 0.9591                                               | 4             |
| Dr4                     | 8.7            | 18.9 | 33.7 | 40.8 | 73.6 | y=0.1567x+0.7662            | -4.89               | 0.9655                                               | 11            |
| Dr5                     | 8.69           | 14.5 | 23.3 | 32.6 | 59.1 | y=0.1298x+1.1352            | -8.75               | 0.9746                                               | 1             |
| Dr11                    | 7.87           | 16.3 | 30.7 | 46.8 | 67.5 | y=0.1578x+0.8615            | -5.46               | 0.999                                                | 10            |
| Dr15                    | 6.9            | 18.1 | 30.7 | 41.8 | 63.9 | y=0.1505x+0.9372            | -6.23               | 0.9836                                               | 7             |
| Dr17                    | 9.7            | 18.9 | 30.7 | 50.8 | 83.6 | y=0.1365x+0.9046            | -3.08               | 0.9943                                               | 12            |
| Dr21                    | 7.3            | 14.9 | 27.7 | 41.5 | 68.6 | y=0.1609x+0.9610            | -5.97               | 0.9917                                               | 9             |
| Dr30                    | 7.69           | 12.1 | 27.8 | 34.9 | 66.1 | y=0.1533x+1.0757            | -7.02               | 0.9682                                               | 5             |
| Dr32                    | 5.69           | 9.1  | 17.8 | 38.9 | 57.1 | y=0.1608x+1.3610            | -8.46               | 0.9869                                               | 2             |
| Dr33                    | 7.13           | 12.4 | 29.8 | 37.9 | 57.1 | y=0.1433x+1.1173            | -7.80               | 0.9823                                               | 3             |

Dr30>Dr3>Dr4>Dr15>Dr11>Dr17。其中,Dr5 在两年中都排名第一,表明 Dr5 具有最强的抗寒

性,Dr17 在两年中均排名最低,表现出最弱的抗寒性。

表 7 2022 年和 2023 年 12 份马蹄金耐寒性综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of cold tolerance of 12 dichondra materials in 2022 and 2023

| 材料编号<br>Material number | Chl    |        | Fv/Fm  |        | P <sub>labs</sub> |        | EL     |        | MDA    |        | 总分<br>Total score |        | 排序<br>Ranking |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|---------------|
|                         | 22     | 23     | 22     | 23     | 22                | 23     | 22     | 23     | 22     | 23     | 22                | 23     |               |
| Dr1                     | 0.0460 | 0.0956 | 0.6000 | 0.4933 | 1.0000            | 1.0000 | 0.7020 | 0.7464 | 0.7333 | 0.6961 | 0.6163            | 0.6063 | 3             |
| Dr2                     | 0.0693 | 0.1089 | 0.9960 | 0.8817 | 0.6152            | 0.5398 | 1.0000 | 1.0000 | 0.2231 | 0.2564 | 0.5807            | 0.5574 | 5             |
| Dr3                     | 0.3435 | 0.4038 | 0.4729 | 0.5494 | 0.1539            | 0.1351 | 0.3899 | 0.2788 | 0.6369 | 0.6168 | 0.3994            | 0.3968 | 8             |
| Dr4                     | 0.2656 | 0.1459 | 0.4137 | 0.5472 | 0.0416            | 0.0365 | 0.3027 | 0.1873 | 0.9044 | 0.9090 | 0.3856            | 0.3652 | 9             |
| Dr5                     | 0.6004 | 0.8145 | 1.0000 | 1.0000 | 0.8516            | 0.7472 | 0.3240 | 0.4195 | 0.8398 | 0.9161 | 0.7232            | 0.7795 | 1             |
| Dr11                    | 0.0000 | 0.0000 | 0.2514 | 0.4183 | 0.1404            | 0.1232 | 0.4817 | 0.4297 | 0.6198 | 0.6451 | 0.2987            | 0.3232 | 11            |
| Dr15                    | 0.1770 | 0.3058 | 0.0000 | 0.0000 | 0.5029            | 0.4412 | 0.4273 | 0.3701 | 0.8265 | 0.6759 | 0.3867            | 0.3586 | 10            |
| Dr17                    | 0.0459 | 0.2138 | 0.0501 | 0.0864 | 0.1405            | 0.1233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0473            | 0.0847 | 12            |
| Dr21                    | 1.0000 | 1.0000 | 0.3467 | 0.2688 | 0.3183            | 0.2793 | 0.3937 | 0.5463 | 1.0000 | 1.0000 | 0.6118            | 0.6189 | 2             |
| Dr30                    | 0.3816 | 0.3686 | 0.8476 | 0.6269 | 0.4914            | 0.4312 | 0.2740 | 0.2735 | 0.7343 | 0.7569 | 0.5458            | 0.4914 | 7             |
| Dr32                    | 0.5293 | 0.8148 | 0.6372 | 0.5970 | 0.3317            | 0.2910 | 0.5754 | 0.6336 | 0.6686 | 0.6748 | 0.5484            | 0.6023 | 4             |
| Dr33                    | 0.2875 | 0.5374 | 0.4713 | 0.3800 | 0.0000            | 0.0000 | 0.5957 | 0.6242 | 0.7806 | 0.9760 | 0.4270            | 0.5035 | 6             |

### 3 讨论

我国暖季型草坪草广泛分布于热带和亚热带地区,其适宜生长温度是26至35℃<sup>[13]</sup>。当外界环境温度低于暖季型草坪草的适宜温度时,其生长发育首先受到抑制,进而出现早衰枯黄等现象,影响草坪的景观效果<sup>[31-32]</sup>。草坪植物的建植效率影响草坪早期景观价值,成坪速度越快意味着能够更快地形成完整的草坪,减少杂草的发生并降低除杂成本<sup>[33]</sup>。本试验结果显示,12份材料的成坪速度差异明显,其中国外商品种银瀑的成坪速度比国审新品种小哨和都柳江慢。这表明从我国西南地区野生材料中可以选择出适宜当地气候条件且扩繁能力更强的乡土新品种。叶色和均一性是作为景观美学的重要体现,均匀且浓绿的叶色能增强绿地景观吸引力和美学价值<sup>[34-35]</sup>。本试验发现,Dr3, Dr5, Dr32和Dr33与其他材料相比均一性更高。由叶色和均一性综合来看,具有深叶色和高均一性的材料如Dr5、Dr32或Dr33具有更好的视觉吸引力和观赏价值,适于商业和住宅区草坪建设中使用<sup>[36]</sup>。绿期长度作为草坪持续服务能力的重要指标,绿期越长草坪草应用价值越高<sup>[37]</sup>。从两年的试验地气温变化来看,2022年秋季降温较2023年早且快,马蹄金作为一种暖季型草种,绿期在降温过程相对平缓的2023年得以延长。此外,Dr5与其他11个马蹄金材料相比拥有更长的绿期,其潜在草坪景观价值更高。值得注意的是,通过构建包括叶片形态、均一性、叶色、绿期、草层高度和成坪速度等坪用性状指标的综合评价体系,以此来综合衡量不同材料间的坪用性能差异,能够得到更加客观的结果<sup>[38-39]</sup>。Dr5在两年的综合坪用性能评价中表现最好,显著优于国外品种Dr30及国内品种Dr32和Dr33,这表明Dr5作为草坪地被植物在园林绿化方面具有突出的应用潜力。

当植物遭受长期的低温胁迫时,细胞内产生过多的活性氧会对膜系统产生氧化伤害,导致细胞膜透性增大,电解质外流,细胞内的离子平衡也随之被破坏<sup>[40-41]</sup>。因此,细胞膜过氧化程度和电解质渗透率常被用来评估植物的低温耐受性<sup>[42]</sup>。丙二醛是一种最主要的细胞膜脂过氧化产物,其含量变化反映出细胞膜氧化损伤的程度,丙二醛含量越高则表明细胞膜过氧化程度越高<sup>[43]</sup>。低温胁迫下,较低的丙二醛含量往往表明其具有较强的抗氧化能力

和抗寒性<sup>[44]</sup>。此外,植物在低温胁迫下维持较低的电解质渗透率则反映了其具有较高的细胞膜稳定性和较强的耐寒能力<sup>[45]</sup>。本试验发现,12个马蹄金材料在响应低温胁迫过程中丙二醛含量和电解质渗透率均显著升高,表明12个材料在两年的田间低温胁迫下均受到严重损伤。但Dr5在2022和2023年低温胁迫末期电解质渗透率最低,细胞膜稳定性最好;而Dr17的电解质渗透率最高,表现出对低温的强敏感性。LT<sub>50</sub>是评价植物抗寒性的重要参数,植物的LT<sub>50</sub>值越低,其耐寒性越强<sup>[46]</sup>。与电解质渗透率结果相一致,12个马蹄金材料之间的LT<sub>50</sub>值存在较大差异,其中Dr5的LT<sub>50</sub>值最低,而Dr7的LT<sub>50</sub>最高。Li等<sup>[47]</sup>研究发现,与其他暖季型狗牙根相比,田间低温胁迫下耐寒性较强的狗牙根新品种Chuannong-3维持了显著较低的丙二醛含量和电解质渗透率,且Chuannong-3的LT<sub>50</sub>也最低。本研究结果表明,野生材料Dr5的耐寒性显著优于其他马蹄金材料,其较强的耐寒性与低温胁迫下维持较少的膜脂过氧化伤害和较高的细胞膜稳定性有关。这与舒必超等<sup>[48-49]</sup>的研究结果一致。Dr5可以作为选育耐寒型马蹄金的候选优良种质。

光合作用相关参数是研究植物耐寒性的重要指标,这些参数包括叶绿素含量、光化学效率及净光合速率等<sup>[50]</sup>。其中,叶绿素是叶绿体中负责吸收和转换光能的主要光合色素,光合性能的强弱可直接反应在叶绿素含量的高度及叶绿体的完整性上,低温会使叶片叶绿素降解加快,导致光合作用受到抑制<sup>[51]</sup>。有研究表明抗寒能力较强的暖季型草坪草品种,其叶绿素含量下降幅度会低于抗寒能力较弱的品种<sup>[52]</sup>。在本试验中,田间低温胁迫显著降低了12个马蹄金材料叶片叶绿素含量,但Dr5在连续两年的低温胁迫下均维持了最高的叶绿素含量。植物叶绿素荧光是植物光合作用研究的有效指标,反映叶片对光能的吸收、传递和转换能力<sup>[53-54]</sup>。当受到低温胁迫时,叶绿素荧光参数的变化可在一定程度上反映低温对植物的伤害<sup>[55]</sup>。其中,Fv/Fm值反映了植物光系统II(PSII)的最大光能转换效率<sup>[56]</sup>,Fv/Fm值的下降表明胁迫引起了光抑制,造成PSII反应中心受损<sup>[57]</sup>。而PI<sub>ABS</sub>反映了PSII从光能捕获到电子传递链的整体能量转换效率,表明植物光合系统的稳定状态,胁迫下PI<sub>ABS</sub>的变化往往比Fv/Fm更敏感<sup>[58-59]</sup>。低温胁迫下,Fv/Fm和PI<sub>ABS</sub>的降低表明PSII受损及光合电子传递受阻<sup>[60]</sup>。田间低温胁迫期

间所有材料的  $F_v/F_m$  值均显著下降,但 Dr5 的  $F_v/F_m$  值降低较少,表明其光化学效率在低温条件下较为稳定。相较于国审新品种 Dr32 和 Dr33,Dr5 的  $F_v/F_m$  值更高,说明 Dr5 耐寒性比国审品种更有优势。低温胁迫下所有材料的  $PI_{ABS}$  值也随胁迫时间的延长显著下降,这反映了持续低温条件下马蹄金光合系统遭受严重损伤。但 Dr5 在连续两年的田间低温胁迫下  $PI_{ABS}$  最高,表明其能在低温胁迫下能够维持最好的光合性能。两年的试验结果表明,12 份马蹄金材料在低温胁迫下光合性能存在显著差异,Dr5 较其他材料光合性能最稳定。在暖季型狗牙根上的研究也表明,田间低温胁迫下耐寒性强的狗牙根材料  $F_v/F_m$  和  $PI_{ABS}$  下降最慢<sup>[47]</sup>。

## 4 结论

本研究通过对 12 份不同来源马蹄金材料的坪用性能与低温耐受性进行系统的综合评价,明确了野生材料 Dr5 是兼具优异坪用价值与超强耐寒能力的优质种质资源。Dr5 具有在低温胁迫下能维持低水平的半致死温度、电解质渗透率和丙二醛含量,同时保持较高的叶绿素含量与稳定的光化学效率。研究结果揭示了马蹄金耐寒性与细胞膜稳定性及光合系统完整性密切相关,通过建立坪用指标和电解质渗透率、叶绿素荧光参数等生理指标的综合评价体系,为暖季型草坪草的抗寒种质筛选提供了标准化方法。

## 参考文献

- [1] 谭雯. 低温胁迫下暖季型草坪草抗寒性比较研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2008:1-3  
TAN W. Study on cold-resistance comparison of four of warm-season turfgrasses under low temperature[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2008:1-3
- [2] SOUALIOU S, DUAN F Y, LI X, et al. Crop production under cold stress: an understanding of plant responses, acclimation processes, and management strategies[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 190:47-61
- [3] 严学东,庄南生. 植物抗寒育种研究进展简述[J]. 热带农业科技, 2006, 29(2):18-22, 27  
YAN X D, ZHUANG N S. A review on the research of plant-cold-resistant breeding [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2006, 29(2):18-22, 27
- [4] AUSTIN D F. The indiscriminate vector: human distribution of *Dichondra micrantha* (Convolvulaceae) [J]. Economic Botany, 1998, 52(1):88-106
- [5] LAWALREE A. Definition, Aire et mode de dissemination de *Dichondra micrantha* urban (Convolvulaceae) [J]. Acta Botanica Neerlandica, 1970, 19(5):717-721
- [6] 杨康. 马蹄金新品系的生产试验及表型与 SSR 分子标记鉴定[D]. 雅安:四川农业大学,2020:1-2  
YANG K. The production test of new *Dichondra repens* strain and identification of phenotype and SSR molecular markers[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020:1-2
- [7] 陈燕,刘忠义,干友民,等. 野生马蹄金无性系构件种群组成及生物量结构变异性[J]. 江西农业学报, 2008, 20(2):23-25, 31  
CHEN Y, LIU Z Y, GAN Y M, et al. Diversity of population component and biomass structure of cloned wild *Dichondra repens* forst [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2008, 20(2):23-25, 31
- [8] 干友民,任婷,陈燕,等. 西南地区野生马蹄金无性繁殖特性研究[J]. 草业科学, 2009, 26(8):163-171  
GAN Y M, REN T, CHEN Y, et al. Asexual reproductive characteristics of wild *Dichondra Repens* in Southwest China [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(8):163-171
- [9] 邱常兵,刘伟,付薇,等. “都柳江”马蹄金的选育及品种特性[J]. 草业与畜牧, 2013(6):35-38  
QIU C B, LIU W, FU W, et al. Selection and Variety characteristics of *Dichondra repens* cv. Duliujiang [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2013(6):35-38
- [10] LING Y, TAN M, XI Y, et al. Differential drought tolerance among *Dichondra* (*Dichondra repens*) genotypes in relation to alterations in chlorophyll metabolism, osmotic adjustment, and accumulation of organic metabolites [J]. Protoplasma, 2024, 261(5):897-909
- [11] 何能学. 马蹄金是亚热带气候区建植休闲草坪的优良草种[J]. 四川草原, 2003(1):40-41  
HE N X. *Dictyophora repens* is an excellent grass species for planting leisure lawn in subtropical climate zone [J]. Journal of Sichuan Grassland, 2003(1):40-41
- [12] 马香香,南丽丽,王利群,等. 紫花苜蓿新品系幼苗对低温胁迫的响应[J]. 中国草地学报, 2025, 47(5):66-77  
MA X X, NAN L L, WANG L Q, et al. Response of seedlings of new alfalfa lines to low temperature stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(5):66-77
- [13] 王婷,陈立坤,胡强,等. 暖季型草坪草的抗寒性研究概况[J]. 草学, 2018(1):7-11  
WANG T, CHEN L K, HU Q, et al. General situation of cold resistance of warm-season turfgrass [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2018(1):7-11
- [14] 李钊. 玉米苗期抗冻生理响应及其转录组调控分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017:5-7  
LI Z. The analysis of physiological response and transcriptome regulation under freezing stress in maize (*Zea mays* L.) [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017:5-7
- [15] 贾祥,多吉格桑,赵爱民,等. 4 种禾本科牧草苗期抗寒性综合评价[J]. 草地学报, 2020, 28(5):1372-1378  
JIA X, DUO J, ZHAO A M, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of 4 species of Gramineae at seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5):1372-1378
- [16] 赵孟良,郭怡婷,孙世英,等. 低温胁迫下 4 种菊芋的耐寒性评价[J]. 植物生理学报, 2020, 56(7):1419-1431  
ZHAO M L, GUO Y T, SUN S Y, et al. Evaluation of cold resistance of four Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) under low temperature stress [J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(7):1419-1431

- [17] LI Y H, SUN Z L, XU X L, et al. Influence of low temperatures on photosystem II photochemistry and expression of the NADPH: protochlorophyllide oxidoreductase in the alpine, subnival perennial, *Chorispora bungeana* [J]. *Photosynthetica*, 2010, 48(3): 457-468
- [18] TANG X D, AN B Y, CAO D M, et al. Improving photosynthetic capacity, alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress under low temperature stress with exogenous hydrogen sulfide in blueberry seedlings [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 108
- [19] GURURANI M A, VENKATESH J, GANESAN M, et al. In vivo assessment of cold tolerance through chlorophyll-a fluorescence in transgenic zoysiagrass expressing mutant phytochrome A [J]. *Plos One*, 2015, 10(5): e0127200
- [20] 曹梦可. 玉米耐寒能力分级及低温对苗期玉米光合生理机制的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016: 35-36
- CAO M K. Screening of cold resistance of different maize cultivars and effects of low temperature on photosynthesis and physiology mechanism of maize during seeding stage [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016: 35-36
- [21] RAPACZ M. Chlorophyll a fluorescence transient during freezing and recovery in winter wheat [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(3): 409-418
- [22] 李君, 周守标, 黄文江. 马蹄金野生种与栽培种在自然降温过程中的抗寒性研究[J]. *草业科学*, 2005, 22(6): 105-107
- LI J, ZHOU S B, HUANG W J. Comparative study of the cold resistance between the wild and the cultivated species of *Dichondra repens* as temperature falls [J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(6): 105-107
- [23] 费凌. 西南区野生马蹄金坪用景观价值评价与抗寒性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007: 8-11
- FEI L. Evaluating the turf landscape quality and study on cold resistance of native *Dichondra repens* in the southwest of China [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007: 8-11
- [24] 费凌, 干友民, 陈燕. 西南区野生马蹄金坪用景观价值研究[J]. *北方园艺*, 2008(1): 165-169
- FEI L, GAN Y M, CHEN Y. Study on turf landscape quality of native *Dichondra repens* in the southwest of China [J]. *Northern Horticulture*, 2008(1): 165-169
- [25] BLUM A, EBERCON A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat [J]. *Crop Science*, 1981, 21(1): 43-47
- [26] 胡文玉, 王兴理, 玄英淑. 二甲基亚砷法测定叶绿素含量[J]. *辽宁农业科学*, 1984(1): 38-41
- HU W Y, WANG X L, XUAN Y S. Determination of chlorophyll content by dimethyl sulfoxide method [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1984(1): 38-41
- [27] VELIKOVA V, YORDANOV I, EDREVA A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines [J]. *Plant Science*, 2000, 151(1): 59-66
- [28] 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究[J]. *南京农业大学学报*, 1986, 9(3): 11-16
- ZHU G H, LIU Z Q, ZHU P R. A study on determination of lethal temperature with logistic function [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1986, 9(3): 11-16
- [29] 张朝阳, 许桂芳. 利用隶属函数法对4种地被植物的耐热性综合评价[J]. *草业科学*, 2009, 26(2): 57-60
- ZHANG Z Y, XU G F. Comprehensive evaluation of heat tolerance of four ground covering plants by subordinate function values analysis [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 57-60
- [30] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1378-1382
- ZHOU G S, MEI F Z, ZHOU Z Q, et al. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1378-1382
- [31] 李源. NaCl胁迫和低温胁迫对五种暖季型草坪草生长及生理指标的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 8-9
- LI Y. Effects of nacl stress and cold stress on growth and physiological indexes of five warm season turfgrasses [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 8-9
- [32] 王钦. 低温对草坪植物生命过程的影响[J]. *草业科学*, 1993, 10(4): 62-65
- WANG Q. Effect of low temperatures on turf plants life [J]. *Pratacultural Science*, 1993, 10(4): 62-65
- [33] 王丽. 四种暖季型草坪草护坡性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010: 8-10
- WANG L. Study on slope protection properties of four warm-season turfgrasses [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2010: 8-10
- [34] KARCHER D E, RICHARDSON M D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis [J]. *Crop Science*, 2003, 43(3): 943-951
- [35] MA B Q, HAUER R J, XU C Y. Effects of design proportion and distribution of color in urban and suburban green space planning to visual aesthetics quality [J]. *Forests*, 2020, 11(3): 278
- [36] 郑海金, 华珞, 高占国. 草坪质量的指标体系与评价方法[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(1): 78-82, 97
- ZHENG H J, HUA L, GAO Z G. A study on indices system and assessment of turf quality [J]. *Journal of Capital Normal University*, 2003, 24(1): 78-82, 97
- [37] 陈蕴, 罗富成. 云南省亚热带野生草坪草栽培试验及坪用性状评价[J]. *草业与畜牧*, 2011(11): 23-25
- CHEN Y, LUO F C. Evaluation on cultivation experiment and turf characters of subtropical native turfgrasses of Yunnan Province [J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2011(11): 23-25
- [38] 胡利珍, 关贤交, 杨知建, 等. 野生结缕草坪用性状的综合评价[J]. *草业科学*, 2010, 27(10): 23-26
- HU L Z, GUAN X J, YANG Z J, et al. Comprehensive evaluation on turf characteristics of *Zoysia japonica* [J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(10): 23-26
- [39] 李晓薇. 7种草坪草在合肥坪用价值的对比分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008: 6-9
- LI X W. Contrast analysis of turf quality on seven species of turf grasses in Hefei [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2008: 6-9
- [40] 赖铭, 陈佳, 张军, 等. 植物低温胁迫响应机制及提高抗冷性研究进展 [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230130.1626.005>. 2023-01-31/2026-04-02: 1-11
- LAI M, CHEN J, ZHANG J, et al. Research progress in plant response mechanism to low temperature stress and improvement of cold resistance [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/>

46. 1068. S. 20230130. 1626. 005, 2023-01-31/2026-03-10; 1-11
- [41] 张伟锋, 陈平, 姬承东. 广州地区几种草坪草低温胁迫效应研究[J]. 草业科学, 2006, 23(8): 85-88  
ZHANG W F, CHEN P, JI C D. Effect of low temperature stress on some turf-grasses in Guangzhou, China[J]. Pratacul-tural Science, 2006, 23(8): 85-88
- [42] DING F, WANG R. Amelioration of postharvest chilling stress by trehalose in pepper[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 232: 52-6
- [43] 吕天放, 徐田军, 刘月娥, 等. 低温胁迫对不同基因型玉米种子萌发特性的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 45-49  
LU T F, XU T J, et al. Effects of low temperature stress on seed germination of different maize[J]. Journal of Maize Sci-ences, 2018, 26(6): 45-49
- [44] 董双慧, 贾明, 张辉, 等. 四倍体青绿苔草对低温的生理响应及耐寒性评价[J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2089-2098  
DONG S H, JIA M, ZHANG H, et al. The physiological response and tolerance evaluation of tetraploid *Carex brevicul-mis* to low temperature[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2089-2098
- [45] RATIVA A G S, DE ARAÚJO JUNIOR A T, DA SILVA FRIEDRICH D, et al. Root responses of contrasting rice geno-types to low temperature stress[J]. Journal of Plant Physiol-ogy, 2020, 255: 153307
- [46] 张倩, 刘崇怀, 郭大龙, 等. 5个葡萄种群的低温半致死温度与其抗寒适应性的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 149-154  
ZHANG Q, LIU C H, GUO D L, et al. Relationship between LT<sub>50</sub> and cold adaptability of five grape varieties[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 149-154
- [47] LI Z, HUANG C, ZHAO J M, et al. A bermudagrass variant exhibits strong tolerance to low temperature associated with enhanced sugar metabolism and cold-responsive pathways[J]. Crop Science, 2023, 63(4): 2553-2568
- [48] 舒必超, 杨勇, 刘雪勇, 等. 低温胁迫对狗牙根生理及基因表达的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(11): 106-119  
SHU B C, YANG Y, LIU X Y, et al. Effect of low temperature stress on physiology and gene expression in Bermuda grass[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(11): 106-119
- [49] 王敏, 李莉, 贾蓉, 等. 10种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价[J]. 草业学报, 2024, 33(6): 76-88  
WANG M, LI L, JIA R, et al. Evaluation of physiological charac-teristics and cold resistance of 10 alfalfa varieties under low tem-perature stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6): 76-88
- [50] 郑锋, 白小明, 冉福, 等. 10份沿阶草族种质材料叶片光合特性对低温胁迫的响应及抗寒性评价[J]. 草原与草坪, 2024, 44(6): 42-52  
ZHENG F, BAI X M, RAN F, et al. Responses of leaf photo-synthetic characteristics to low temperature stress in 10 Ophio-pogoneae germplasms and evaluation of cold resistance[J]. Grassland and Turf, 2024, 44(6): 42-52
- [51] 段伟, 穆妮热·米吉提, 加米丽古丽·伊明, 等. 20份黄花苜蓿种质低温胁迫生理响应及抗寒性评价[J]. 草地学报, 2026, 34(2): 611-623  
DUAN W, Munire Mijiti, Jiamiliguli Yiming, et al. Physiologi-cal responses to Low- temperature stress and cold resistance evaluation of 20 *Medicago falcata* Germplasms[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 611-623
- [52] 赵娜, 徐庆国, 苏鹏, 等. 7个暖季型草坪草品种对低温胁迫的抗性差异研究[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 375-382  
ZHAO N, XU Q G, SU P, et al. Resistance to low temperature of 7 warm-season turfgrass varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 375-382
- [53] WHITE A J, CRITCHLEY C. Rapid light curves: A new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus[J]. Photosynthesis Research, 1999, 59(1): 63-72
- [54] 冯延芝, 赵阳, 王保平, 等. 干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 1-8  
FENG Y Z, ZHAO Y, WANG B P, et al. Effects of drought and rewating on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Paulownia catalpifolia* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(4): 1-8
- [55] 吴金芝, 王志敏, 李友军, 等. 不同冬小麦品种旗叶叶绿素荧光特性及其对干旱胁迫的响应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 699-706  
WU J Z, WANG Z M, LI Y J, et al. Flag leaf chlorophyll fluo-rescence characteristics and its response to drought stress in dif-ferent cultivars of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(5): 699-706
- [56] 靳川, 查天山, 贾昕, 等. 干旱环境3种荒漠灌木叶绿素荧光参数动态[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 72-80  
JIN C, ZHA T S, JIA X, et al. Dynamics of chlorophyll fluo-rescence parameters under drought condition for three desert shrub species[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 72-80
- [57] 杨猛, 魏玲, 庄文锋, 等. 低温胁迫对玉米幼苗电导率和叶绿素荧光参数的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(1): 90-94  
YANG M, WEI L, ZHUANG W F, et al. Effects of low-tem-perature stress on electric conductivity and fluorescence param-eters of maize seedling[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(1): 90-94
- [58] YANG H Z, YUAN Y, LIU X Y, et al. Phytohormonal homeo-stasis, chloroplast stability, and heat shock transcription path-ways related to the adaptability of creeping bentgrass species to heat stress[J]. Protoplasma, 2025, 262(3): 649-665
- [59] 汪华, 苏明, 吴佳瑞, 等. 宁南山区马铃薯叶片叶绿素荧光、物质积累与转运对磷素添加的响应[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.q.20250523.1013.006>, 2025-05-23/2026-04-02: 1-11.  
WANG H, SU M, WU J R, et al. Response of potato leaf chlo-rophyll fluorescence, material accumulation, and transport to phosphorus addition in Ningnan mountain area [J/OL]. Chinese Journal of Ecology, <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.q.20250523.1013.006>, 2025-05-23/2026-04-02: 1-11.
- [60] 方青春, 冯训宁, 何丽. 几个胡麻品种光合生理特性叶绿素荧光参数和产量的比较[J]. 农业与技术, 2025, 45(8): 30-37  
FANG Q C, FENG X N, HE L. Comparison of photosynthetic physiological characteristics, chlorophyll fluorescence param-eters and yield of several flax varieties[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(8): 30-37