

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0528

赵春程, 李晓宁, 张寅坤, 张婷, 傅金民. 4 个多年生黑麦草品种对干旱胁迫的生理响应. 草业科学, 2020, 37(4): 669-677.
ZHAO C C, LI X N, ZHANG Y K, ZHANG T, FU J M. Physiological correspondence of four varieties of perennial ryegrass to drought stress. Pratacultural Science, 2020, 37(4): 669-677.

4 个多年生黑麦草品种对干旱胁迫的生理响应

赵春程, 李晓宁, 张寅坤, 张 婷, 傅金民

(山东省滨海耐盐草业工程技术研究中心 / 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264000)

摘要: 为研究不同品种多年生黑麦草 (*Lolium perenne*) 的抗旱能力, 选取 4 个多年生黑麦草品种, 采用水培试验的方法, 在温室利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫, 测定多年生黑麦草的草坪质量、地上部与地下部增长量、含水量、叶绿素含量以及抗氧化酶活性等生理指标。研究表明, 干旱胁迫至 10 d 时, 4 个多年生黑麦草品种生长均受到明显抑制, 同时 4 个品种的植株含水量都处于下降的趋势。此外, 4 个品种中超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等抗氧化酶活性都出现了先上升后下降的趋势, 丙二醛含量增加。利用隶属函数分析法进行抗旱性评价。结果表明, 4 种多年生黑麦草的抗旱能力强弱表现为 Pr521 > 维达斯 > 百灵鸟 > Pr525。

关键词: 多年生黑麦草; 抗旱性; 干旱胁迫

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)04-0669-09

Physiological correspondence of four varieties of perennial ryegrass to drought stress

ZHAO Chun Cheng, LI Xiaoning, ZHANG Yinkun, ZHANG Ting, FU Jinmin

(Coastal Salinity Tolerant Grass Engineering and Technology Research Center Resource and Environmental Engineering College / Ludong University, Shandong Province, Yantai 264000, Shandong, China)

Abstract: In order to study the drought resistance of different varieties of perennial ryegrass (*Lolium perenne*), four perennial ryegrass varieties were selected, and turf quality was determined by hydroponic experiment in the greenhouse using Macrogol 6000 (PEG-6000) to simulate drought stress. The physiological indexes of perennial ryegrass were determined, such as turf quality, aerial growth and root growth, water content, chlorophyll content and antioxidant enzyme activity. Results showed that after ten days of drought stress, the growth of the four perennial ryegrass varieties was obviously inhibited, and the water content of the four varieties was decreasing. In addition, the activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase, peroxidase and catalase in the four varieties initially increased, and then decreased, and the content of malondialdehyde increased. Ranking of drought resistance was carried out using membership function analysis. The results indicated that the drought resistance of the four perennial ryegrass varieties ranked as: Pr521 > Vidas > Larking > Pr525.

Keywords: *Lolium perenne*; drought resistance; drought stress

Corresponding author: FU Jinmin E-mail: turfcn@qq.com

收稿日期: 2019-10-25 接受日期: 2019-11-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于 CRISPR/Cas 9 技术解析多年生黑麦草耐盐 MATE 基因分子调控网络”(31772662)

第一作者: 赵春程 (1994-), 男, 山东烟台人, 在读硕士生, 研究方向为草坪草抗旱。E-mail: 17852615728@163.com

通信作者: 傅金民 (1961-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士, 研究方向为草坪草抗逆生理。E-mail: turfcn@qq.com

干旱是世界上最严重的非生物胁迫之一,到目前为止全球有 40% 的土地处于干旱以及半干旱区域。据报告,干旱加剧、气候变暖和人口迅速增长将在不久的将来加剧干旱地区土地退化和沙漠化的风险。到 21 世纪末,世界陆地面积将超过 50% 处于干旱胁迫下,并且大部分处于发展中国家^[1]。根据联合国的报告,世界水资源自 1970 年以来一直在减少,预计在未来 20 年内还将进一步减少 1/3。水资源短缺,导致植物可利用水分减少,造成作物减产甚至死亡^[2]。干旱已经成为限制农业、草坪以及牧草发展的主要因素之一,在植物生长发育过程中对植物的形态、生理生化以及代谢过程产生不利影响^[3]。干旱会使植物叶片脱水,导致植物严重枯萎,影响其生长发育,导致叶片衰老甚至死亡。当植物遭受干旱胁迫时,体内产生并积累大量活性氧 (eactive oxygen species, ROS),对植物的细胞造成不可逆转的损伤,对植物的生理与结构产生破坏,影响植物正常生长^[4]。为了清除过量积累的 ROS,植物进化出一套高效而又复杂的抗氧化酶系统去除多余的 ROS,维持植物正常生长^[5]。然而,植物对于干旱胁迫的响应因品种而异^[6]。

多年生黑麦草 (*Lolium perenne*) 是冷季型牧草和草坪草,喜温凉湿润气候,广泛引种栽培于全国各地。多年生黑麦草成坪速度快、再生能力强、营养价值高,因此可广泛作为商业化草坪草和牧草。而我国北方大部分地区干旱缺水,并且由于气候变化加剧,我国通常较为湿润的南方也经常遭受干旱灾害,而多年生黑麦草不同品种之间抗旱能力差异较大,大多数品种抗旱水平差,容易导致黑麦草受害严重,建坪失败。此外,以往的研究中,关于多年生黑麦草抗旱能力研究往往多为商业品种,但是关于商业品种与种质材料的抗旱能力差异研究相对较少^[7-8]。因此,研究干旱胁迫下黑麦草的抗逆生理特性,对耐旱品种的引种以及选育具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

为探究不同品种多年生黑麦草抗旱能力差异,明确其遭受干旱胁迫后生长生理状况,本研究采

用 4 个多年生黑麦草品种:百灵鸟(购买于百绿公司)、维达斯(购买于百绿公司)、Pr521 与 Pr525(鲁东大学收获)。其中百灵鸟与维达斯为两种应用较为广泛的商业品种,拥有一定的抗逆能力,而 Pr521 与 Pr525 是鲁东大学培养的两种种质材料,在干旱胁迫条件下生长状况较为良好。

1.2 试验处理

使用 1/2 Hoagland 营养液配置的不同浓度 PEG-6000 溶液 (0、10%、15%、20%) 处理黑麦草幼苗,用以模拟不同的干旱胁迫程度,以 PEG-6000 浓度为 0 设为对照,当 PEG 浓度为 10% 时设为轻度干旱胁迫,PEG 浓度为 20% 时为重度干旱胁迫。设置 4 个处理,每个处理设置 4 个重复。

在种植前将多年生黑麦草种子浸泡 24 h,在浸泡过程中保持通风,避免种子死亡,待种子吸饱水后将其撒播在黑色塑料管 (高 25 cm、直径 10 cm) 表面,并覆一层蛭石,每日浇一次水,直至种子萌发。待种子萌发后,改换为每 2 d 浇灌一次 1/2 Hoagland 营养液。待苗生长至三叶期时进行定株,每个管内保留生长旺盛、高度相似的苗 5 株,生长时间 1 周。1 周后首先将所有植株的地上部与地下部剪至相同的高度 8 cm,然后将黑塑料管转移至含有不同浓度 PEG-6000 溶液的白色塑料箱中,进行处理,处理时间 10 d。

1.3 测定指标及方法

多年生黑麦草的草坪质量采用目测打分法^[9];地上部 (包含茎和叶) 生长高度与根系生长长度采用直尺测量;叶绿素含量测定采用二甲亚砷萃取法^[10];使用南京建成生物工程研究所销售的丙二醛 (MDA) 测定试剂盒 (TBA 法) 与过氧化氢测定试剂盒 (比色法) 分别测定 MDA 和 H_2O_2 含量;过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法^[11];超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用 NBT 还原法^[12];过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法^[13];抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性采用紫外吸收法^[14]。

1.4 数据处理

用 SPSS 22.0 进行单因素分析,使用 Sigmaplot 9.0 绘制图表,利用隶属函数法进行 4 个品种的抗旱能力进行综合评价^[15-17]。

1.4.1 各指标的隶属函数值

当指标与植物耐受性正相关时：

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

当指标与植物耐受性负相关时：

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}).$$

式中： $X_{\max}$ 与 $X_{\min}$ 为某一指标的最小值与最大值； X_i 为某一指标的测定值； $U(X_i)$ 为各个指标的隶属值，与耐受值呈正相关关系^[18]。

1.4.2 平均隶属值

$$X = \sum_{i=1}^n U(X_i) / n.$$

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草草坪品质与枯叶率的影响

使用 NTEP 九分制打分法对干旱胁迫下多年生黑麦草的草坪品质进行打分。枯叶率为出现枯黄的叶片数占总叶片数的百分比。4 个品种多年生黑麦草百灵鸟、维达斯、Pr521、Pr525 的草坪品质和枯叶率的变化总体一致，在干旱胁迫下，草坪品质随着胁迫程度的提高逐步降低，枯叶率随着胁迫程度的提高逐步增高(图 1)。当 PEG 浓度为 15% 时，Pr521 与 Pr525 两种种质材料草坪品质与枯叶率明显优于维达斯与百灵鸟两种商业品种。当 PEG 浓度为 20% 时，4 个品种多年生黑麦草的草坪品质得分分别为 4.85，4.75，4.87，4.87，均处于 5 分左

右，并且枯叶率处于较高的状态，但品种之间无显著差异($P > 0.05$)，与对照相比，4 个品种多年生黑麦草的草坪品质与枯叶率均受到干旱胁迫的显著影响($P < 0.05$)。因此当干旱胁迫水平较低时，Pr521 与 Pr525 的草坪质量比百灵鸟与维达斯更优秀，更适宜作为建坪材料。

2.2 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草地上部生长高度与根系长度的影响

在干旱胁迫下，4 种多年生黑麦草地上部生长高度与根系生长长度均有所降低(表 1)，但是受抑制程度不同，并且随着胁迫程度提高，受到抑制逐步显著。与对照相比，当 PEG 浓度到达 20% 时，百灵鸟、维达斯、Pr521、Pr525 地上部高度分别下降了 44%、30%、51%、47%，可见干旱胁迫对维达斯地上部生长状况影响较小，而对其余 3 个品种影响较大。然而，当 PEG 浓度为 20% 时，与对照相比，4 个品种多年生黑麦草根系长度分别下降了 31%、32%、27%、42%，Pr525 根系生长长度受干旱胁迫抑制更为显著，其余 3 个品种差异较小。因此，当 PEG 浓度为 20% 时，维达斯的生长状况受抑制水平较低，拥有较强的抗旱能力。

2.3 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草地上部含水量与叶绿素含量的影响

植物维持正常的生长发育需要一定的水分，当土壤中含水量过低导致供水量不足时，就会造成

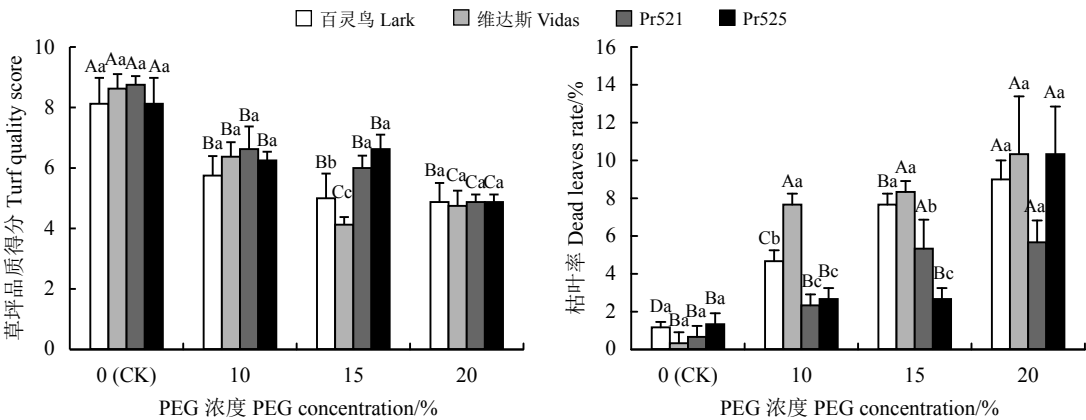


图 1 不同程度干旱胁迫下多年生黑麦草草坪品质得分与枯叶率

Figure 1 Perennial ryegrass turf quality and dead leaf rate under different degrees of drought stress

不同大写字母表示相同品种不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同处理不同品种之间差异显著 ($P < 0.05$)；下同。
Different capital letters indicate significant differences between the different treatments of the same variety at the 0.05 level, and different lowercase letters indicate significant differences between different varieties of the same treatment at the 0.05 level; similarly for the following tables and figures.

表 1 干旱胁迫下多年生黑麦草地上部生长高度与根系生长长度
Table 1 Growth height and root length of perennial ryegrass under drought stress

PEG浓度 PEG concentration/%	地上部生长高度 Aboveground growth height/cm				根系生长长度 Root growth length/cm			
	百灵鸟 Lark	维达斯 Vidas	Pr521	Pr525	百灵鸟 Lark	维达斯 Vidas	Pr521	Pr525
0 (CK)	7.67 ± 1.47Ab	16.50 ± 0.84Aa	14.67 ± 0.95Aa	7.13 ± 0.39Ab	10.31 ± 0.38Abc	10.47 ± 0.30Ab	9.26 ± 0.50Ac	13.35 ± 0.99Aa
10	6.14 ± 0.59ABc	15.42 ± 0.86Aa	11.92 ± 0.35Bb	5.56 ± 0.77Bc	9.90 ± 0.45Aab	8.95 ± 1.00Bbc	8.38 ± 0.41ABc	10.50 ± 0.48Ba
15	5.45 ± 0.32BCc	13.85 ± 0.051Ba	9.21 ± 0.19Cb	4.42 ± 0.16Cd	8.27 ± 0.50Ba	8.00 ± 0.78Bca	7.76 ± 1.01BCa	8.97 ± 0.45Ca
20	4.33 ± 0.38Cc	11.63 ± 0.80Ca	7.25 ± 0.42Db	3.75 ± 0.46Cc	7.07 ± 0.05Ca	7.12 ± 0.39Ca	6.79 ± 0.84Ca	7.72 ± 0.42Da

干旱胁迫，造成植物含水量降低，影响植物正常生长发育。在受到胁迫时，叶片的光合速率受到抑制，叶绿素等光合色素生成受阻，不能正常进行光合作用。本研究中，在干旱胁迫下，多年生黑麦草的地上部含水量与叶绿素含量大体都是下降的趋势，并且随着胁迫程度提高，下降趋势越明显 (图 2)。当 PEG 浓度为 20% 时，4 种多年生黑

麦草的地上部含水量比对照分别下降了 20% (百灵鸟)、27% (维达斯)、28% (Pr521) 和 28% (Pr525)，百灵鸟地上部含水量受干旱胁迫影响较低。当 PEG 浓度为 20% 时，4 种多年生黑麦草的叶绿素含量下降了 28% (百灵鸟)、48% (维达斯)、44% (Pr521) 以及 42% (Pr525)，同样百灵鸟的叶绿素含量受干旱胁迫影响较小。

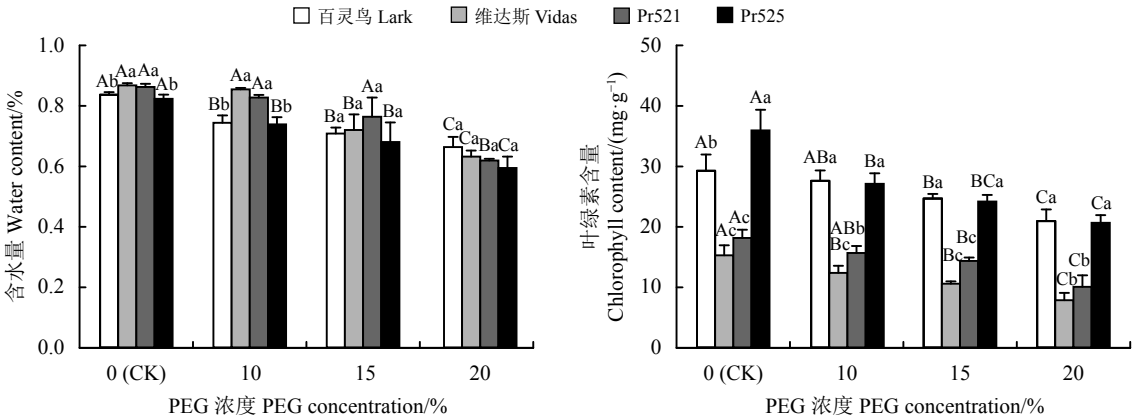


图 2 干旱胁迫下多年生黑麦草地上部含水量与叶绿素含量

Figure 2 Water content and chlorophyll content in perennial ryegrass under drought stress

2.4 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草 MDA 和 H₂O₂ 含量的影响

植物在胁迫环境中会产生大量的 ROS，过量的 ROS 会对植物细胞产生极大的毒害，其中 H₂O₂ 就是主要的 ROS 之一，H₂O₂ 的含量可以表明植物受胁迫程度，丙二醛 (MDA) 含量反映植物细胞受损程度。在干旱胁迫下，植物的 H₂O₂ 含量迅速升高，活性氧含量迅速增高，植物细胞受损，MDA 含量升高，当 PEG 浓度达到 15% 时，随着 PEG 浓度提高，MDA 含量无显著变化，当 PEG 浓度为 20% 时，4 个品种多年生黑麦草 MDA 含量分别为对照的 1.75 倍 (百灵鸟)、1.79 倍 (维达斯)、1.54 倍

(Pr521) 和 2.58 倍 (Pr525)，Pr525 受干旱胁迫影响较强。PEG 浓度较低时，H₂O₂ 含量升高明显，随着 PEG 浓度提高，H₂O₂ 含量升高较小。其中维达斯 H₂O₂ 含量受 PEG 模拟干旱胁迫影响较小，当 PEG 浓度为 20% 时，H₂O₂ 含量比对照提高了 27%，而百灵鸟、Pr521 和 Pr525 分别为对照的 2.8 倍、2.2 倍和 2.5 倍 (图 3)。

2.5 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草抗氧化酶活性的影响

2.5.1 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草 SOD 活性的影响

植物体内 SOD 酶可以将 ·O₂⁻ 歧化为 H₂O₂ 与 O₂，进而清除由胁迫产生的 ·O₂⁻，减轻胁迫对植物

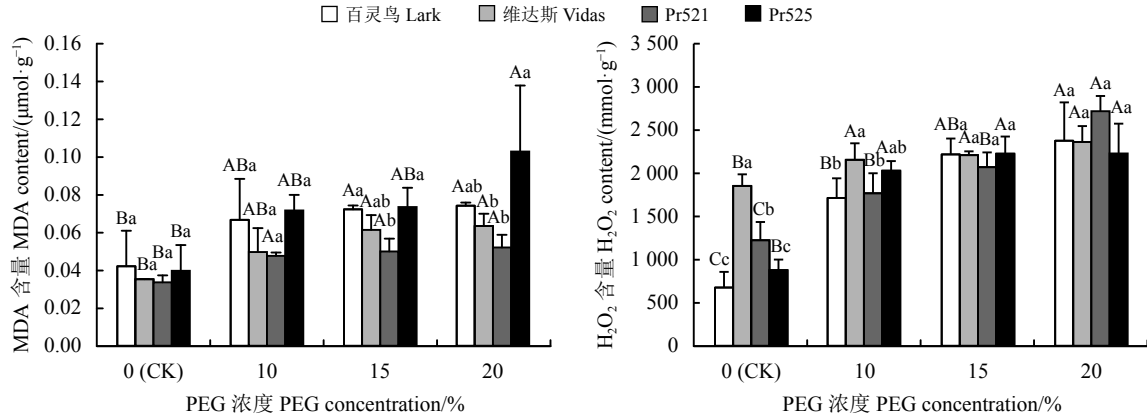


图3 干旱胁迫下多年生黑麦草丙二醛和过氧化氢含量

Figure 3 Malondialdehyde and H₂O₂ content of perennial ryegrass under drought stress

造成的伤害。处理 10 d 时, 除百灵鸟外的 3 种多年生黑麦草 SOD 活性随着胁迫程度增加呈现出先上升后下降, 而百灵鸟是处于不断上升趋势 (图 4)。维达斯、Pr521 与 Pr525 SOD 活性都是在 PEG 浓度为 15% 时到达最高, 然后迅速下降, 这是由于在干旱胁迫到达一定程度时, 其自身受到了严重损害, 降低了对 SOD 酶的调控能力, 而百灵鸟却没有出现这种现象。

2.5.2 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草 POD 活性的影响

干旱胁迫下, 4 种多年生黑麦草 POD 活性大体都呈现出先上升后下降的趋势 (图 5)。PEG 浓度为 10% 时, 百灵鸟和维达斯的 POD 活性达到最大值, 随着浓度的继续增大, 活性逐步下降; 当 PEG 浓度为 15% 时, Pr521 与 Pr525 的 POD 活性达到最大值, 之后逐步下降。其中 Pr521 的 POD 活性受干

旱影响最为显著, 当 PEG 浓度为 15% 时, 其 POD 活性是对照的 3.5 倍。

2.5.3 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草 CAT 活性的影响

CAT 可以将植物体内由于胁迫产生的过量 H₂O₂ 氧化生成 H₂O 与 O₂, 减少活性氧 H₂O₂ 对植物造成的损害。在干旱胁迫下, 4 种多年生黑麦草的 CAT 活性都呈现出先上升后下降的趋势 (图 6), Pr521 与 Pr525 在 PEG 浓度为 10% 时达到最大值, 而维达斯与百灵鸟则在 PEG 浓度 15% 时达到最大值, 当 CAT 活性达到最大值后随着 PEG 浓度增大迅速下降。当 PEG 浓度为 20% 时, 4 种多年生黑麦草均受到严重损害。

2.5.4 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草 APX 活性的影响

APX 可以将过量 H₂O₂ 催化为 MDA 与 H₂O, 减少 H₂O₂, 降低活性氧对植物造成的伤害。4 个品种多年生黑麦草 APX 活性随着 PEG 浓度增大都呈

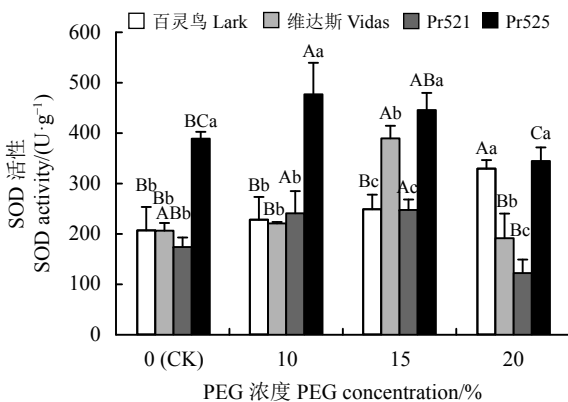


图4 干旱胁迫下多年生黑麦草超氧化物歧化酶活性

Figure 4 Superoxide dismutase activity of perennial ryegrass under drought stress

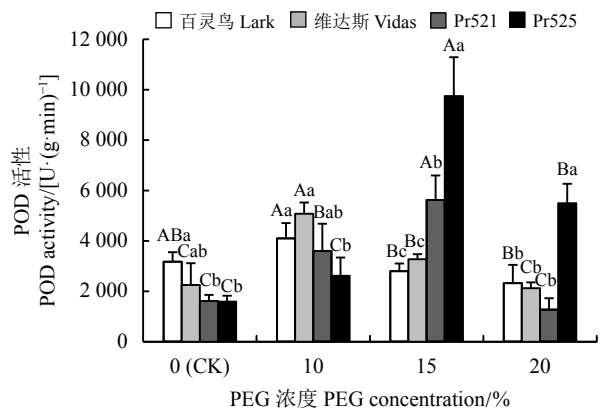


图5 干旱胁迫下多年生黑麦草过氧化物酶活性

Figure 5 Peroxidase activity of perennial ryegrass under drought stress

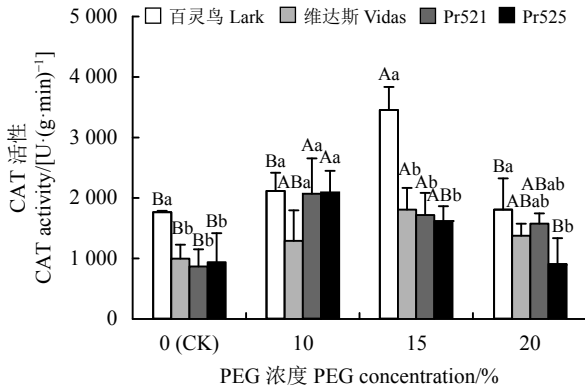


图 6 干旱胁迫下多年生黑麦草过氧化氢酶活性
Figure 6 Catalase activity of perennial ryegrass under drought stress

现出先提高后降低的趋势 (图 7)。其中百灵鸟与 Pr525 在 PEG 浓度为 10% 时到达最大值, 维达斯与 Pr521 在 PEG 浓度为 15% 时到达最大值。百灵鸟与 Pr525 的 APX 活性受 PEG 影响更大, 当 PEG 浓度为 10% 时, 其 APX 活性相比对照分别提升 68% 和 45%。

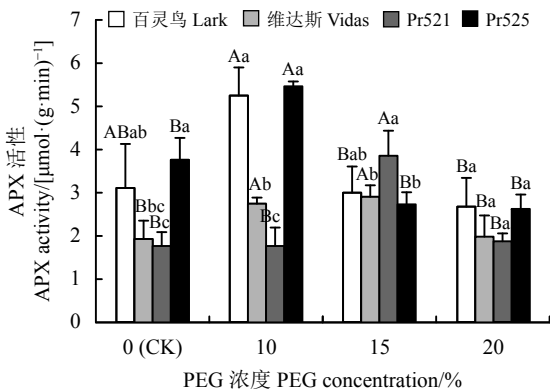


图 7 干旱胁迫下多年生黑麦草抗坏血酸过氧化物酶活性
Figure 7 Ascorbate peroxidase activity of perennial ryegrass under drought stress

2.6 干旱胁迫对 4 种多年生黑麦草的耐旱性评价

利用隶属函数法对 4 种多年生黑麦草的 12 项生长生理指标进行耐旱性综合评价, 以每个品种的各项生长生理指标的隶属值的平均值作为不同品种多年生黑麦草进行耐旱性评价的综合标准, 平均值与耐旱能力呈正相关关系, 即该值越大则其耐旱能力越强。结果表明, 4 个品种的多年生黑麦草在干旱胁迫下平均隶属值分别为 0.479、0.485、0.488 和 0.427, 表明 4 个品种的多年生黑麦草的

抗旱能力顺序为 Pr521 > 维达斯 > 百灵鸟 > Pr525 (表 2)。

3 讨论

本研究通过测定 4 种多年生黑麦草草坪品质、枯叶率、地上部与地下部生长高度、地上部含水量、叶绿素含量、MDA 含量、 H_2O_2 含量以及抗氧化酶活性等 12 个指标对其抗旱能力进行综合性评价, 减少单一指标的误差^[19]。随着胁迫程度的提高, 草坪质量、生长高度、含水量、叶绿素含量都呈现下降的趋势, 枯叶率、MDA 含量、 H_2O_2 含量呈现提高的趋势, 而 4 种抗氧化酶活性则随着胁迫程度的提高呈现出先升高后降低的趋势, 多年生黑麦草的生长及生理状况都因干旱胁迫而产生了极大的抑制, 因此草坪质量等指标可以作为评定多年生黑麦草抗旱能力的指标^[20-21]。

叶绿素是植物主要光合色素之一, 光合色素的含量会影响植物的光合作用, 影响植物对光能的转化^[22]。干旱胁迫会影响植物光合色素的生成, 减少叶绿素含量, 影响光合作用, 因此, 叶绿素含量可以作为反映植物抗旱能力的指标。本研究中, 随着胁迫程度提高, 叶绿素含量降低, 并且随着胁迫程度提高下降越明显, 当 PEG 浓度为 20% 时, 4 种多年生黑麦草的叶绿素含量相比对照下降了 28% (百灵鸟)、48% (维达斯)、44% (Pr521) 以及 42% (Pr525)。百灵鸟的叶绿素含量相比其他 3 个品种受干旱胁迫影响较小, 叶绿素含量相对稳定, 对光合作用的影响较小, 在一定水平上表明百灵鸟的抗旱能力强于其他 3 个品种。

植物受到非生物胁迫会产生大量的 ROS, 导致植物细胞发生膜脂过氧化, 对植物细胞的形态与结构造成严重的损害, MDA 是细胞膜脂过氧化的产物, 其含量可以在一定程度上反映植物细胞受损程度^[23-24]。本研究表明, 4 种多年生黑麦草在受到干旱胁迫后活性氧含量与 MDA 含量提高, 说明多年生黑麦草在受到干旱胁迫后产生的活性氧会损害植物细胞, 但是当 PEG 浓度低于 15% 时变化明显, 超过 15% 后由于植物受损过于严重, 失去了进行调控的能力。当 PEG 浓度为 20% 时, 维达斯的 H_2O_2 含量提升仅为 27%, 远远低于其余 3 个品种, 并且其 MDA 含量升高较小, 受干旱胁迫影响较小, 细胞受损程度较小。因此维达斯的耐旱

表 2 4 个品种多年生黑麦草对干旱胁迫的耐受性综合评价
Table 2 Comprehensive evaluation of tolerance of four varieties of perennial ryegrass to drought stress

生长生理指标 Growth physiological index	百灵鸟 Lark	维达斯 Vidas	Pr521	Pr525
草坪质量 Turf quality	0.39	0.30	0.46	0.44
枯叶率 Dead leaf rate	0.51	0.51	0.50	0.27
地上部生长高度 Aboveground growth height	0.39	0.54	0.43	0.46
根系生长长度 Root growth length	0.51	0.45	0.55	0.40
地上部含水量 Aboveground water content	0.51	0.61	0.60	0.51
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.50	0.47	0.55	0.39
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.50	0.39	0.56	0.42
过氧化物酶活性 POD activity	0.46	0.45	0.38	0.35
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.38	0.50	0.51	0.48
抗坏血酸过氧化物酶活性 APX activity	0.39	0.53	0.30	0.42
MDA 含量 MDA activity	0.63	0.50	0.54	0.40
H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ activity	0.58	0.57	0.48	0.58
平均值 Average value	0.479	0.485	0.488	0.427
耐旱能力排序 Rank of drought tolerance	3	2	1	4

能力高于百灵鸟等其他 3 个品种，MDA 含量以及活性氧含量可以作为反映多年生黑麦草抗旱能力的指标。

为了清除由于胁迫产生的过量活性氧，植物通过进化产生了抗氧化酶系统，维持植物体内活性氧动态平衡，提高植物抗逆能力，减少植物受损程度^[25-26]。在干旱胁迫下，4 种多年生黑麦草的 SOD、POD、CAT 以及 APX 的活性都是随着胁迫程度的提高呈现出先上升后下降的状态，都在 PEG 浓度为 10% 或 15% 时到达最大值，之后随着胁迫程度的继续提高而显著下降，说明在胁迫程度较低时抗氧化酶可以清除过量的活性氧维持植株正常生长生理活性，但是当胁迫程度较高时，植物受损严重，降低抗氧化酶对活性氧的调控能力。

4 结论

近年来，人们对草坪草抗旱能力的研究取得了较大的进展，但是一直没有一个较为成熟的评价体系。植物在胁迫环境下生长发育繁殖受多个因素共同影响，并非是由某一个特定因子进行控制。本研究利用 4 个品种多年生黑麦草的 12 个生长生理指标进行综合性评价，在一定程度上避免了单一指标而产生的局限性，隶属函数法进行多指标综合评价可以在一定程度上提高准确程度。本研究通过隶属函数对生长生理指标进行分析得到 4 个品种多年生黑麦草的抗旱能力为 Pr521 > 维达斯 > 百灵鸟 > Pr525，为干旱地区选择较耐旱品种提供了一定的理论依据。

参考文献 References:

[1] HUANG J, YU H, GUAN X, WANG G, GUO R. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166.
[2] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1/2): 123-138.

- [3] WANG W, VINOCUR B, SHOSEYOV O, ALTMAN A. Biotechnology of plant osmotic stress tolerance physiological and molecular considerations. *Acta Horticulture*, 2000, 560: 285-292.
- [4] 王福祥, 肖开转, 姜身飞, 曲梦宇, 连玲, 何炜, 陈丽萍, 谢华安, 张建福. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制. *科学通报*, 2019, 64(17): 1765-1779.
- WANG F X, XIAO K Z, JIANG S F, QU M Y, LIAN L, HE W, CHEN L P, XIE H A, ZHANG J F. Mechanisms of reactive oxygen species in plants under drought stress. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(17): 1765-1779.
- [5] 赖金莉, 李欣欣, 薛磊, 陈凌艳, 荣俊冬, 何天友, 郑郁善. 植物抗旱性研究进展. *江苏农业科学*, 2018, 46(17): 23-27.
- LAI J L, LI X X, XUE L, CHEN L Y, RONG J D, HE T Y, ZHENG Y S. Research progress on drought resistance of plants. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(17): 23-27.
- [6] ZABET M, HOSSEINZADEH A, AHMADI A, KHIALPARAST F. Effect of water stress on different traits and determination of the best water stress index in mung bean (*Vigna radiate*). *Journal of Agriculture Science and Technology*, 2003, 34(4): 889-898.
- [7] 魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 张辰露. 利用隶属函数法评价苜蓿抗旱性. *草业科学*, 2005, 22(6): 33-36.
- WEI Y S, LIANG Z S, SHAN L, ZHANG C L. Comprehensive evaluation on alfalfa drought-resistance traits by subordinate function values analysis. *Pratacultural Science*, 2005, 22(6): 33-36.
- [8] 周碧华, 毕玉芬, 侯旭光. 根冠淀粉水解法鉴定多年生黑麦草抗旱性. *草业科学*, 1994, 11(3): 49-51.
- ZHOU B H, BI Y F, HOU X G. Starch hydrolyzed method of tip cap to diagnose the drought resistance of perennial ryegrass. *Pratacultural Science*, 1994, 11(3): 49-51.
- [9] 刘杰, 江生泉. 3 种草坪草在滁州地区成坪质量比较研究. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2018, 36(4): 83-86.
- LIU J, JIANG S Q. Comparative study on the quality of three turfgrass in Chuzhou area. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 2018, 36(4): 83-86.
- [10] 陈振德, 傅以彬, 邹琦, 程炳嵩, 梁作勤. 二甲亚砷和丙酮混合法测定叶绿素含量. *山东农业大学学报*, 1989(2): 34-38.
- CHEN Z D, FU Y B, ZOU Q, CHENG B S, LIANG Z Q. Determination of chlorophyll content by the mixed method of dimethyl sulphoxide with acetone. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1989(2): 34-38.
- [11] 张金民, 任晓雪, 秦伟, 陈昆. 干旱胁迫对西瓜叶抗氧化酶活性、叶绿素荧光参数及根系活力的影响. *天津农业科学*, 2018, 24(11): 1-3.
- ZHANG J M, REN X X, QIN W, CHEN K. Effects of drought stress on antioxidant enzyme activities, chlorophyll fluorescence parameters and root activity of watermelon leaves. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, 24(11): 1-3.
- [12] 陈嫣嫣, 王瑛, 张林娟. 黄金菊抗寒性生理指标的测定研究. *上海建设科技*, 2018(5): 63-66, 88.
- CHEN Y Y, WANG Y, ZHANG L J. Study on the determination of physiological indexes of resistance to *Chrysanthemum frutescens*. *Shanghai Construction Science & Technology*, 2018(5): 63-66, 88.
- [13] 朱爱民, 张玉霞, 王显国, 王月林, 张庆昕, 侯文慧, 杜晓艳. 不同施氮水平对羊草抗衰老能力的影响. *草原与草坪*, 2019(2): 39-46.
- ZHU A M, ZHANG Y X, WANG X G, WANG Y L, ZHANG Q X, HOU W H, DU X Y. Effects of applying nitrogen fertilizer on leaf senescence characteristics of *Leymus chinensis* in sandy land. *Grassland and Turf*, 2019(2): 39-46.
- [14] 沈文飏, 徐朗莱, 叶茂炳, 张荣铨. 抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨. *植物生理学通讯*, 1996(3): 203-205.
- SHEN W B, XU L L, YE M B, ZHANG R X. Study on determination of ASP activity. *Plant Physiology Communications*, 1996(3): 203-205.
- [15] 许桂芳. 用隶属函数法对 4 种地被植物的耐热性综合评价. *草业科学*, 2009, 26(2): 57-60.
- XU G F. Comprehensive evaluation of heat tolerance of four ground covering plants by subordinate function values analysis. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 57-60.
- [16] 曹志华, 吴中能, 蔡如胜, 刘俊龙, 高健. 安徽省不同毛竹种源抗寒性生长生理指标的综合评价. *竹子学报*, 2018, 37(3): 45-50.
- CAO Z H, WU Z N, CAI R S, LIU J L, GAO J. Comprehensive evaluation on the growth and physiological indexes of cold resistance of different phyllostachys edulis provenance in Anhui Province. *Journal of Bamboo Research*, 2018, 37(3): 45-50.
- [17] 李鹏程, 陈奇凌, 王晶晶. 干旱胁迫下不同产地酸枣抗性生理指标综合评价. *新疆农业科学*, 2017, 54(4): 618-625.
- LI P C, CHEN Q L, WANG J J. Comprehensive evaluation of the wild Jujube resistance physiological indexes in different

- producing areas under the condition of drought stress. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(4): 618-625.
- [18] 郭慧, 吕长平, 郑智, 刘飞, 丁丁. 园林植物抗旱性研究进展. 安徽农学通报, 2009, 15(7): 53-55.
GUO H, LYU C P, ZHENG Z, LIU F, DING D. Advances in research of drought resistance of landscape plants. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(7): 53-55.
- [19] 宋娅丽, 王莎, 王克勤, 张倩, 马志, 陈佳钰, 李珠宇. 3种冷季型草坪草苗期对干旱胁迫的生理响应. *草原与草坪*, 2018, 38(3): 9-16.
SONG Y L, WANG S, WANG K Q, ZHANG Q, MA Z, CHEN J Y, LI Z Y. Physiological and ecological responses of three cool-season turfgrasses to drought stress at seedling stage. *Grassland and Turf*, 2018, 38(3): 9-16.
- [20] 及利, 韩姣, 王芳, 王君, 宋笛, 张丽杰, 祁永会, 杨雨春. 干旱胁迫对不同土壤基质下核桃楸幼苗的生理特性的影响. *植物研究*, 2019, 39(5): 722-732.
JI L, HAN J, WANG F, WANG J, SONG D, ZHANG L J, QI YH, YANG Y C. Effects of drought stress on photosynthetic and physiological characteristics of *Juglans mandshurica* seedlings in different soil substrates. *Bulletin of Botanical Research*, 2019, 39(5): 722-732.
- [21] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响. 西北植物学报, 2011, 31(1): 109-115.
SANG Z Y, MA L Y, CHEN F J. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(1): 109-115.
- [22] 吴成龙, 尹金来, 徐阳春, 刘兆普, 沈其荣, 周春霖. 碱胁迫对菊芋幼苗生长及其光合作用和抗氧化作用的影响. *西北植物学报*, 2006(3): 447-454.
WU C L, YIN J L, XU Y C, LIU Z P, SHEN Q R, ZHOU C L. Effects of alkaline stress on growth, photosynthesis and antioxidation of *Helianthus tuberosus* seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006(3): 447-454.
- [23] 覃鹏, 刘叶菊, 刘飞虎. 干旱胁迫对烟草叶片丙二醛含量和细胞膜透性的影响. *亚热带植物科学*, 2004(4): 8-10.
QIN P, LIU Y J, LIU F H. Effects of drought stress on malondialdehyde content and cell membrane permeability in tobacco leaves. *Subtropical Plant Science*, 2004(4): 8-10.
- [24] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 周健. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响. 生态学报, 2017, 37(24): 8511-8517.
LI Z Y, CONG R C, YANG Q S, ZHOU J. Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8511-8517.
- [25] 孙晓春, 黄文静, 李铂, 汪荔, 唐志书. 外源水杨酸对干旱胁迫下桔梗幼苗生理生化指标的影响. 北方园艺, 2019(16): 121-125.
SUN X C, WANG W J, LI B, WANG L, TANG Z S. Effects of exogenous salicylic acid on physiological characteristics of seedlings under drought stress of *Platycodon grandiflorus*. *Northern Horticulture*, 2019(16): 121-125.
- [26] 黄婵. 植物抗旱生理基础研究进展. 农村实用技术, 2019(6): 62-64.
HUANG C. Advances in research on physiological basis of plant drought resistance. *Applicable Technologies for Rural Areas*, 2019(6): 62-64.

(责任编辑 王芳)

如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。