

# PEG-6000模拟干旱胁迫对5个禾本科牧草品种幼苗抗氧化酶系统的影响

刘杰<sup>1,2</sup>, 王玉辉<sup>1</sup>, 刘海聪<sup>1\*</sup>, 罗黎明<sup>3</sup>, 张彩峡<sup>1</sup>

(1.西藏职业技术学院动物科学技术学院,西藏拉萨850030;2.西藏大学生态环境学院,西藏拉萨850000;3.西藏自治区农牧科学院农业研究所,西藏拉萨850000)

**摘要:**为探究禾本科牧草苗期对干旱胁迫的响应,筛选出耐旱材料,选取5个禾本科牧草品种为研究对象,采用PEG-6000模拟干旱胁迫对禾本科牧草幼苗进行干旱处理,通过分析牧草幼苗的形态特征和抗氧化酶系统的活性变化,采用隶属函数法综合评价了5个禾本科牧草品种的抗旱性。研究发现,在干旱胁迫下,5个禾本科牧草品种的植株表型和生理特性均受到不同程度影响。不同禾本科牧草品种对于干旱胁迫的适应机制是受多指标综合调控的。通过采用隶属函数综合分析,5个禾本科牧草品种的抗旱性强弱顺序依次为:小麦-高峰>燕麦-优牧1号>小黑麦-新麦1代>燕麦-麦多>燕麦-莫妮卡。牧草品种小麦-高峰能在干旱胁迫下保持较高的生长能力,以维持其在逆境中的生长发育,此外还能增加体内的抗氧化酶活性,通过消除活性氧来提高牧草对逆境的抵抗能力。综上所述,牧草品种小麦-高峰表现出更强的抗旱能力,可为培育抗旱型牧草品种提供材料基础,也为人工草地建植、草地生产力的提高和生态修复提供依据。

**关键词:**干旱胁迫;禾本科牧草;幼苗;抗氧化酶系统

中图分类号:S812.8

文献标志码:A

## Effects of PEG-6000 Simulated Drought Stress on Antioxidant Enzyme Systems of Five Varieties of Gramineous Forage Grass Seedlings

LIU Jie<sup>1,2</sup>, WANG Yuhui<sup>1</sup>, LIU Haicong<sup>1\*</sup>, LUO Liming<sup>3</sup>, ZHANG Caixia<sup>1</sup>

(1.College of Animal Science and Technology, Tibet Vocational Technology College, Tibet Lhasa 850030, China;2.College of Ecology and Environment, Tibet University, Tibet Lhasa 850000, China;3.Institute of Agricultural, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850000, China)

**Abstract:** In order to investigate the response of grass forage seedlings to drought stress and to screen out drought-tolerant materials, five grass forage varieties were selected as the research objects in this experiment, and PEG-6000 was used to simulate drought stress on grass forage seedlings, and the drought tolerance of the five grass forage varieties was comprehensively evaluated by affiliation function method through analyzing the morphology of the seedlings and the changes in the activities of antioxidant enzyme systems. It was found that under drought stress, the plant phenotypes and physiological characteristics of the five grass forage species were affected to different degrees. The adaptive mechanism of different grass forage species to drought stress was regulated by multiple indicators, and the order of drought resistance of the five grass forage species analyzed by using the affiliation function was as follows: *Triticum aestivum*-Gaofeng > *Avena sativa*-Youmu Number 1 > *Triticale*-Xinmai Generation 1 > *Avena sativa*-Maiduo > *Avena sativa*-Monika. The results showed that the forage variety *Triticum aestivum*-Gaofeng could maintain high growth capacity under drought stress to sustain its growth and development in adversity, in addition, it could increase the activity of antioxidant enzymes in the body, and improve the resistance of the forage to adversity by eliminating reactive oxygen species. In summary, the forage grass variety *Triticum aestivum*-Gaofeng showed stronger drought resistance, which can provide a material basis for cultivating drought-resistant forage grass varieties, as well as a basis for artificial grassland establishment, improvement of grassland productivity and ecological restoration.

**Key Words:** drought stress; gramineous forage grass; seedling; antioxidant enzyme systems

收稿日期:2024-04-10

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题及西藏中央引导地方资金配套项目:西藏高寒区生态草牧业科技示范(XDA26050501,XZ202301YD0012C);校级科研课题(2020YBKT-08);专业带头人骨干教师队伍建设项目(0804F202305)。

作者简介:刘杰(1989-),男,在读博士,讲师,主要从事牧草的抗逆性、植物多样性等相关研究,E-mail:625374002@qq.com;

\*为通信作者:刘海聪(1981-),男,教授,主要从事牧草栽培与乡土牧草资源保育与开发利用等相关研究,E-mail:463341698@qq.com。

近年来,随着全球气温升高和人类活动,水资源短缺引起干旱胁迫加剧。干旱严重限制了农业发展,是影响生态环境建设的重要因素<sup>[1-2]</sup>。干旱由于其发生频率高、持续时间长和影响范围广等特点,严重影响了牧草和畜产品生产,并加剧了草场退化和沙漠化<sup>[3]</sup>。西藏是青藏高原的主体,地形复杂多变,平均海拔在4 000 m以上,干旱是当地植物生长的主要限制因子。由于气候条件和人为活动的影响,西藏牧草资源严重不足,尤其是冬春季饲草<sup>[4]</sup>。因此,引进优质牧草,加快人工草地建设,是西藏草地畜牧业转变发展方式的必由之路。

禾本科(Gramineae)是植物古老类群之一,禾本科植物在人类发展过程中有很重要的地位,是天然草地改良与人工草地建植的主要牧草种类来源,不仅在退耕还草、水土保持等生态恢复建设中发挥着重要作用,而且由于禾本科牧草产量高、品质优、适口性好、适应性广等特点,在我国草地畜牧业发展中扮演着重要角色<sup>[5]</sup>。

本研究以5个禾本科牧草品种为试验材料,探讨在干旱胁迫下牧草的形态特征变化以及牧草内抗氧化酶系统的调控,了解禾本科牧草耐旱的生理机制,并采用隶属函数综合分析法对5个禾本科牧草品种幼苗期的抗旱性进行综合评价,为今后在西藏深入开展人工草地种植和饲草育种提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为5个禾本科牧草品种,包括:燕麦-优牧1号(*Avena sativa*-Youmu Number 1)、小麦-高峰(*Triticum aestivum*-Gaofeng)、燕麦-麦多(*Avena sativa*-Mai Duo)、小黑麦-新麦1代(*Triticale*-Xin mai Generation 1)、燕麦-莫妮卡(*Avena sativa*-Mo Ni Ka),均由北京百斯特草业有限公司提供。

### 1.2 试验处理

试验在西藏职业技术学院草业技术实验室进行。选取籽粒饱满的种子,前期对种子育苗,放到含有滤纸的托盘中,种子萌发12 d后,再移栽到以椰砖土为基质的栽植盆中进行培养。试验设计两组处理,一组为对照组(正常浇水),一组为干旱胁迫处理,采用PEG-6000溶液(质量比例为15%)模拟干旱胁迫。胁迫处理14 d后,幼苗长到“两叶一心”时进行采样,将取好的样品迅速放入液氮中,随后放入-80℃低温冰箱保存。

### 1.3 测定指标

形态指标:用直尺测量各牧草样品的株高和根长,每组牧草材料取18株,并记录数据,取平均值。

生理指标:超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)采用试剂盒(WST-1法)测定;过氧化物酶(Peroxidase, POD)采用试剂盒(比色法)测定;过氧化氢酶(Cata-lase, CAT)采用试剂盒(紫外法)测定。试剂盒购于索莱宝(Solarbio)生物科技有限公司。

### 1.4 抗旱性综合评价

采用隶属函数值法<sup>[6]</sup>对5份禾本科牧草材料进行抗旱性评价。当测定指标与抗旱性成正相关时,隶属函数值的计算公式为: $U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ ;当测定指标与抗旱性呈负相关时,则采用反隶属函数公式计算: $U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ 。

式中 $U_{ij}$ 为供试牧草材料的隶属函数值,其中 $i$ 表示供试材料, $j$ 表示测定指标; $X_{jmax}$ 为各指标的最大值, $X_{jmin}$ 为各指标的最小值。将5份禾本科牧草材料各个形态和生理指标的隶属函数值累加求平均值,平均值越大,表明该供试材料抗旱性越强。

### 1.5 数据处理

采用R软件对牧草株高、根长、SOD、POD、CAT在两组不同处理下的结果进行 $T$ 检验差异性分析,显著性水平设定为0.05,以评价干旱对牧草幼苗的影响;再用Excel对5种禾本科牧草品种进行抗旱性隶属函数分析;采用Microsoft Excel 2021作图,以评价干旱胁迫下各指标变化趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对牧草形态特征的影响

图1为干旱胁迫下5个禾本科牧草品种幼苗株高和根长的变化。在干旱胁迫下,燕麦-优牧1号、小黑麦-新麦1代和燕麦-莫妮卡的株高较对照组分别下降了6.93% ( $p > 0.05$ )、8.53% ( $p < 0.05$ )和7.05% ( $p > 0.05$ );而在干旱胁迫下,小麦-高峰和燕麦-麦多的株高较对照组分别提高了0.80%和1.59%,变化差异均无统计学意义( $p > 0.05$ )。5个禾本科牧草品种在干旱胁迫下,根长较对照组分别提高了16.90%、23.51%、3.32%、18.22%和2.55%,其中小麦-高峰的根长增长比例最高,但变化差异均无统计学意义( $p > 0.05$ )。

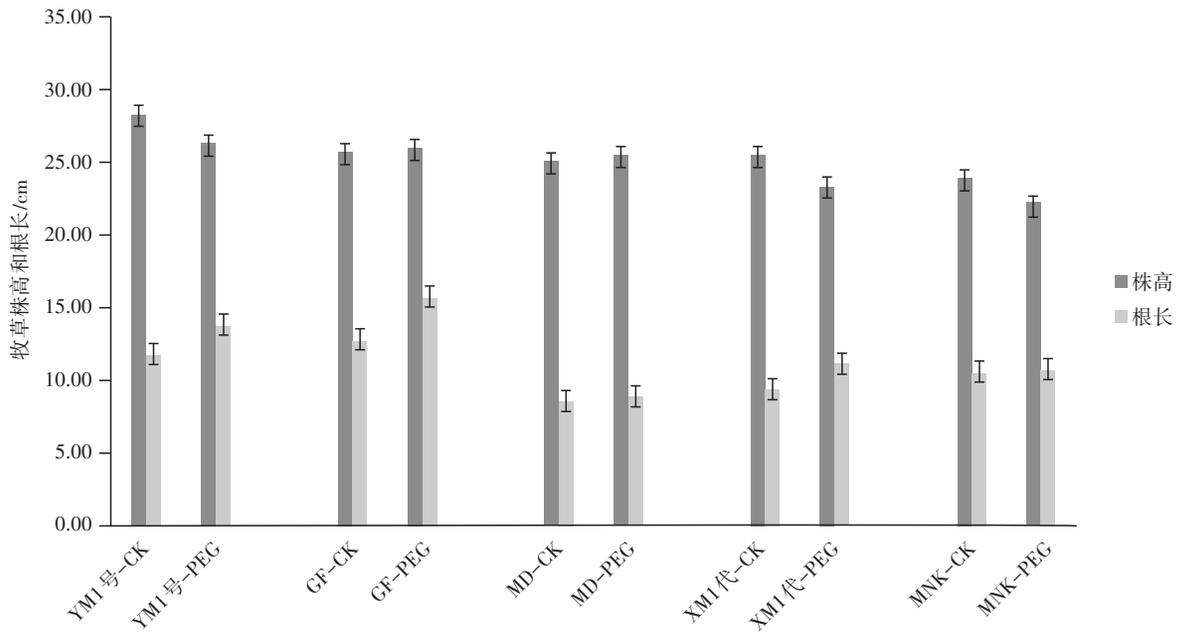
### 2.2 干旱胁迫对牧草幼苗超氧化物歧化酶(SOD)的影响

从图2可知,在干旱胁迫下,燕麦-优牧1号、小麦-高峰和燕麦-莫妮卡的SOD活性较对照组分别

下降了76.88% ( $p < 0.01$ )、68.97% ( $p < 0.01$ )和56.07% ( $p < 0.05$ ),差异均具统计学意义;在干旱胁迫下,燕麦-麦多和小黑麦-新麦1代的SOD活性较对照组都升高了,其中燕麦-麦多的SOD活性较对照组提高了38.70% ( $p > 0.05$ ),变化差异无统计学意义,而小黑麦-新麦1代的SOD活性较对照组提高了68.97% ( $p < 0.01$ ),变化差异极具统计学意义。

**2.3 干旱胁迫对牧草幼苗过氧化物酶(POD)的影响**  
图3为干旱胁迫下5个禾本科牧草品种幼苗

POD活性的变化。在干旱胁迫下,燕麦-优牧1号和小黑麦-新麦1代的POD活性较对照组分别下降了29.01% ( $p < 0.01$ )和6.96% ( $p > 0.05$ );在干旱胁迫下,小麦-高峰、燕麦-麦多和燕麦-莫妮卡的POD活性较对照组都升高了,其中小麦-高峰和燕麦-莫妮卡的POD活性较对照组分别提高了205.44% ( $p < 0.01$ )和274.29% ( $p < 0.01$ ),差异均极具统计学意义;燕麦-麦多的POD活性较对照组提高了6.33% ( $p > 0.05$ ),差异无统计学意义。



注:YM1号表示燕麦-优牧1号,GF表示小麦-高峰,MD表示燕麦-麦多,XM1代表示小黑麦-新麦1代,MNK表示燕麦-莫妮卡;CK表示对照,PEG表示干旱胁迫。图2至图4同。

图1 干旱胁迫下5个禾本科牧草品种幼苗株高和根长的变化

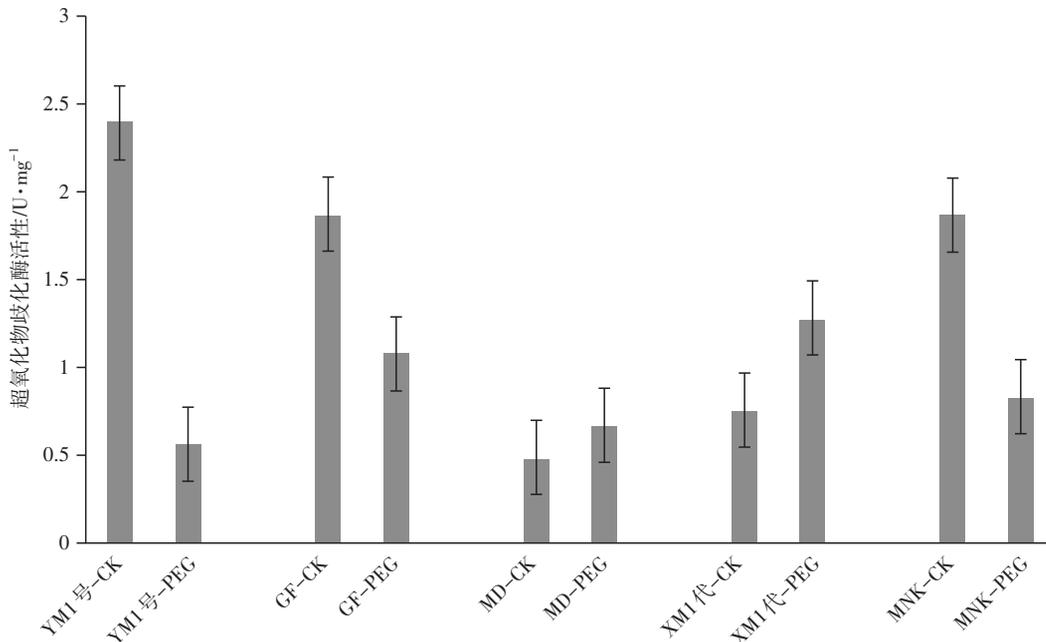


图2 干旱胁迫下5个禾本科牧草品种幼苗超氧化物歧化酶活性变化

2.4 干旱胁迫对牧草幼苗过氧化氢酶(CAT)的影响

由图4可知,在干旱胁迫下,5个禾本科牧草品种的CAT活性较对照组都升高了,变化趋势呈现一致,其中燕麦-优牧1号、小麦-高峰和小麦-新麦1代的CAT活性较对照组分别增加了147.02% ( $p < 0.01$ )、54.01% ( $p < 0.05$ )和24.75% ( $p < 0.05$ ),差异均具统计学意义;燕麦-麦多和燕麦-莫妮卡的CAT活性较对照组分别提高了15.60% ( $p > 0.05$ )和19.87% ( $p > 0.05$ ),差异均无统计学意义。

2.5 5个禾本科牧草品种幼苗抗旱性隶属函数分析

采用隶属函数分析法对5个禾本科牧草品种幼

苗生长形态指标和生理生化指标进行综合评价。由表1可知,5个牧草品种的抗旱性排序为:小麦-高峰>燕麦-优牧1号>小黑麦-新麦1代>燕麦-麦多>燕麦-莫妮卡。

表1 5个禾本科牧草品种幼苗期抗旱性综合评价

品种名	隶属函数值						排序
	SOD	POD	CAT	株高	根长	平均值	
YM1号	1.000	0.000	0.172	1.000	0.731	0.581	2
GF	0.994	0.454	0.721	0.640	1.000	0.762	1
MD	0.000	0.677	1.000	0.503	0.000	0.436	4
XM1代	0.489	1.000	0.491	0.329	0.309	0.524	3
MNK	0.856	0.603	0.000	0.000	0.390	0.370	5

注:YM1号为燕麦-优牧1号,GF为小麦-高峰;MD为燕麦-麦多;XM1代为小黑麦-新麦1代;MNK为燕麦-莫妮卡。

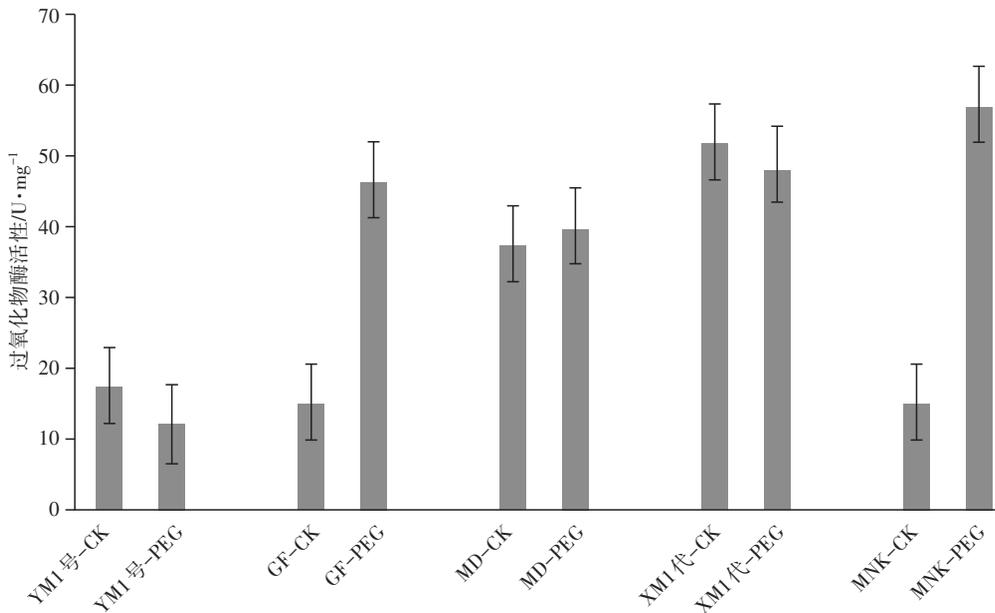


图3 干旱胁迫下5个品种禾本科牧草幼苗过氧化物酶活性的变化

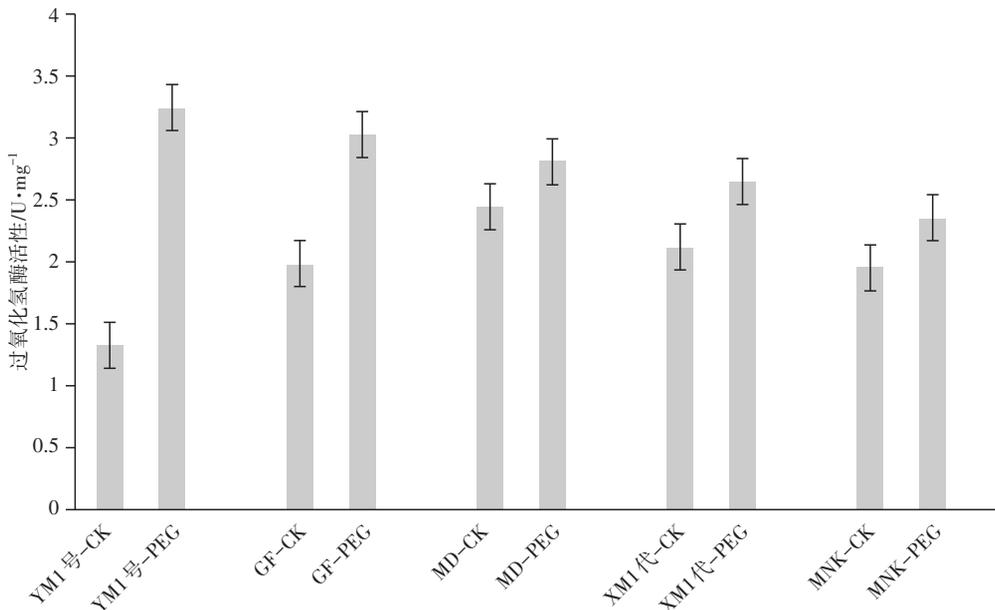


图4 干旱胁迫下5个禾本科牧草品种幼苗过氧化氢酶活性的变化

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

干旱是制约植物生长发育的主要环境胁迫因素,对植物形态特征、生理生化特性等产生重要影响<sup>[7]</sup>。牧草在生育期内的生长发育进程是牧草自身对外界环境的适应性反应。牧草株高的生长程度可以直接反应牧草生长能力的强弱<sup>[8]</sup>。本研究结果显示,在干旱胁迫下,小麦-高峰和燕麦-麦多的株高比对照组都提高了,表明此两种牧草的抗旱能力较强;而燕麦-优牧1号、小黑麦-新麦1代和燕麦-莫妮卡的株高在干旱胁迫下较对照组都下降了,表明干旱胁迫对牧草的株高生长有一定抑制作用,这与许丽丽等<sup>[9]</sup>对血叶兰(*Ludisia discolor*)的研究结果一致。

植物在干旱胁迫下,牧草根系为了适应干旱而发生变化,从而有利于吸收更多水分,以供根系本身和地上部分生长的需要<sup>[10]</sup>。本研究结果表明,5个禾本科牧草品种在干旱胁迫下的根长较对照组都增加了,表明牧草根系的延伸是对干旱胁迫的一种响应,根系越深,其抗旱性越强,这与赵佳佳等<sup>[11]</sup>对小麦(*Triticum aestivum*)的研究结果一致;其中小麦-高峰根长的增长幅度最大,表明其抗旱性相对较强。

牧草的抗旱能力强弱不仅表现在植物形态特征上,植物的生理机制变化也是评价植物抗旱性的重要指标<sup>[12]</sup>。SOD、POD、CAT组成了植物自身抗氧化酶防御系统。SOD是植物抗氧化酶系统中的重要成员,也是第一道防线,主要参与清除 $O_2^-$ ,产生 $H_2O_2$ ,提高植物组织的抗氧化能力,从而降低和缓解植物受到逆境伤害,POD和CAT则是协同清除细胞内过多的过氧化氢,使其保持在一个较低的水平,从而保护细胞膜的结构<sup>[13]</sup>。本研究通过测定5个禾本科牧草品种幼苗的抗氧化酶活性,干旱胁迫下部分牧草植物的SOD、POD活性较对照组升高,部分牧草植物的SOD、POD活性较对照组下降,而5个禾本科牧草品种的CAT活性较对照组均表现为一定程度增加,表明不同牧草品种抗氧化防御能力与机制不同,干旱胁迫下不同牧草品种SOD、POD、CAT 3种酶的协同作用存在差异,此结果与纪童等<sup>[14]</sup>对7种禾本科牧草抗旱性研究与评价的结果一致。但Fu等<sup>[15]</sup>发现草地早熟禾(*Poa pratensis*)在长期轻度干旱胁迫下,其SOD、POD和CAT的活性均下降,这与本研究结果有一定的差异,可能与不同牧草品种的抗旱机制、干旱胁迫时长、干旱胁迫程度等因素有关。当胁迫达到一定程度时,牧草体内的抗氧化酶活性开始降低,这可能是植物对干旱胁迫的耐受能力有阈值,一旦超过这个阈值,其代谢将开始紊乱,酶活性也因此降低<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 结论

不同禾本科牧草品种对干旱胁迫的适应机制是受多指标综合调控的,因此,本研究采用隶属函数分析。通过对5个禾本科牧草品种幼苗期的植株表型和生理特性的综合分析,干旱胁迫下其抗旱性强弱排序为:小麦-高峰>燕麦-优牧1号>小黑麦-新麦1代>燕麦-麦多>燕麦-莫妮卡。其中,牧草品种小麦-高峰能在干旱胁迫下保持较强的生长能力,以维持其在逆境中的生长发育,此外,还能增加体内的抗氧化酶活性,通过消除活性氧来提高牧草对逆境的抵抗能力。综上所述,牧草品种小麦-高峰受干旱胁迫的影响最小,表现出更强的抗旱能力,可为培育抗旱型牧草品种提供材料基础,也为西藏地区的人工草地建植、草地生产力的提高和生态修复提供依据。

#### 参考文献:

- [1] FATHI A, TARI D B. Effect of Drought Stress and its Mechanism in Plants[J]. International Journal of Life Sciences, 2016, 10(1): 1-6.
- [2] ZANDALINAS S I, MITTLER R, BALFAGON D, et al. Plant adaptations to the Combination of Drought and High Temperatures [J]. Physiologia Plantarum, 2018, 162(1): 1-12.
- [3] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展 [J]. 草业学报, 2008(2): 126-135.
- [4] 刘杰, 拉多, 武俊喜, 等. 低温干旱复合胁迫对两个黑麦品种幼苗生理特性的影响[J]. 高原科学研究, 2017, 1(1): 57-66.
- [5] 刘金龙, 王莹, 许爱云, 等. 干旱胁迫下5种禾本科牧草幼苗期的生理特性[J]. 草业科学, 2018, 35(5): 1106-1115.
- [6] 杨雨薇, 王琳, 卢俊峰, 等. 应用隶属函数法评价10个紫花苜蓿品种的耐热性[J]. 草原与草坪, 2021, 41(4): 81-88.
- [7] ZAHEDI S M, HOSSEINI M S, HOVEIZEH N F, et al. Physiological and Biochemical Responses of Commercial Strawberry Cultivars under Optimal and Drought Stress Conditions [J]. Plants, 2023, 12(3): 496-509.
- [8] 王晓龙. 五种禾本科牧草生物学特性、农艺性状及抗逆性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [9] 许丽丽, 孟新亚, 尤燕平, 等. 血叶兰幼苗对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性指标筛选[J]. 亚热带植物科学, 2024, 53(1): 12-21.
- [10] 王莹. 五种禾本科牧草抗旱性综合评价 [D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [11] 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 等. 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 714-727.
- [12] 邵惠芳, 陈征, 许嘉阳, 等. 两种烟草幼苗叶片对不同强度干旱胁迫的生理响应比较[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1861-1871.
- [13] 刘杰, 武俊喜, 拉多, 等. 低温干旱复合胁迫对小黑麦幼苗生理生化性能的影响[J]. 西藏农业科技, 2022, 44(2): 53-61.
- [14] 纪童, 蒋齐, 王占军, 等. 7种禾本科牧草抗旱性研究与评价[J]. 草业学报, 2022, 31(7): 144-156.
- [15] FU J M, HUANG B R. Involvement of Antioxidants and Lipid Peroxidation in the Adaptation of Two Cool-season Grasses to Localized Drought Stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45: 105-114.
- [16] 罗鑫, 闫利军, 李达旭, 等. 野生垂穗披碱草种质资源抗旱性筛选与评价[J]. 草地学报, 2024(7): 1-12.