

doi:10.11937/bfyy.20171463

燕麦萌发期幼苗对 PEG 胁迫的生理响应

张宇君¹, 赵丽丽¹, 陈超¹, 王普昶², 李继伟³

(1. 贵州大学 动物科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省草业研究所, 贵州 贵阳 550025;

3. 北京佰青源畜牧业科技发展有限公司, 北京 100010)

摘要:以 6 个燕麦品种为试材, 设置不同的 PEG 胁迫强度, 研究各燕麦品种主要生理指标的变化情况, 以探究不同燕麦品种萌发期幼苗对 PEG 胁迫的生理适应机制。结果表明: 不同燕麦品种幼苗的丙二醛含量随 PEG 胁迫强度的加重而不断累积, 细胞膜损伤逐渐加重; 抗氧化酶活性以及可溶性蛋白质(SP)含量在低浓度胁迫时逐渐增大, 维持细胞内的渗透势, 保护细胞膜免遭伤害, 高浓度胁迫时表现为抑制作用, 生理系统破坏严重; 结合 GGE 双标图, 发现不同燕麦品种适应 PEG 胁迫的作用生理指标不同: “甘早燕麦”通过 SOD 调节; “奥塔燕麦”和“青海 444 燕麦”由 SP 和 MDA 调节适应; “甜燕 1 号燕麦”通过 POD、CAT 调节; -0.4 MPa 渗透胁迫环境具有较好的区分力和代表性, 可作为燕麦生产的最佳胁迫强度和优良燕麦品种筛选的浓度。

关键词:燕麦; 干旱胁迫; 生理指标; GGE 双标图

中图分类号:S 512.604.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)21-0024-07

燕麦(*Avena sativa* L.)属禾本科燕麦属(*Avena* L.)一年生草本植物, 既是重要的药食同

源作物, 又是饲草兼用作物^[1]。其本身具有较高的营养价值, 氨基酸组成全面, 具有美容、食疗、保健等功效^[2], 是一种高能、高营养的低糖食品。目前, 在世界各地广泛栽培且已确认的燕麦品种共约 30 种, 我国主要分布在华北、西北和西南等高寒及干旱半干旱地区^[3]。近年来随着全球气候变暖, 不定期干旱或季节性干旱在这些地区愈加频繁发生, 因此, 燕麦抗旱生理研究已成为研究重要内容之一^[4]。张娜等^[5]对干旱胁迫下燕麦叶片抗氧化酶活性等生理特性变化研究中发现, 在干旱胁迫条件下, 燕麦的膜脂过氧化水平升高, 在膜脂过氧化程度较低时可通过增强保护酶活性清除活性氧自由基以避免干旱对其造成伤害, 从而增强

第一作者简介:张宇君(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为牧草种质资源研究及育种。E-mail: zhangyj_92@163.com

责任作者:赵丽丽(1981-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事牧草种质资源等研究工作。E-mail: zhaolili_0508@163.com

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502607); 国家自然科学基金资助项目(31560664); 国家科技支撑计划资助项目(2014BAD23B03); 贵州省农业攻关计划资助项目(黔科合 NY 字[2014]3048 号, 黔科合支撑[2016]2516 号); 贵州大学研究生创新基金资助项目(研农 2017002)。

收稿日期:2017-07-13

with the two controls, the vitamin C content of G1R1 increased by 121.60% and 465.29%. The soluble protein content was 19.05% lower than CK1, but 8.80% higher than CK2. However, the nitrate content was 18.89% and 28.09% higher than CK1 and CK2, respectively. The nitrite content of G1R1 was decreased by 37.84% and 41.03%, respectively. Also, the cucumber plants of G1R1 treatment had better growth performance and production than the controls.

Keywords: cucumber(*Cucumis sativus*); compost tea; foliar application; growth; fruit quality

抗旱性。LAWLOR^[6]的研究中表明,燕麦在干旱胁迫下会表现出蛋白质合成速率下降、细胞脱水、膜系统遭到破坏等一系列不良的生理反应。干旱胁迫不仅影响燕麦的光合性能,而且对燕麦细胞膜透性及流动性、体内丙二醛含量等均有显著影响^[7-9]。虽然前人已从渗透调节物、抗氧化酶、无机离子等各方面对燕麦进行了大量生理效应的相关研究,但针对不同燕麦品种在不同程度干旱胁迫下的生理响应机制研究少见报道。因此,研究燕麦品种在不同干旱胁迫强度下的生理效应具有重要意义。

萌发期是植物适应干旱胁迫最为关键的时期,影响着立苗和后期的生长发育^[10]。目前,对植物萌发期抗旱研究常采用聚乙二醇(PEG-6000)、甘露醇等高渗溶液模拟干旱胁迫的方法^[11],其中以 PEG-6000 使用最为广泛^[12]。因而,该研究以 6 个不同燕麦品种为试材,采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫的方法,设置不同的 PEG 胁迫梯度,比较分析在不同 PEG 胁迫强度下 6 种燕麦品种萌发期幼苗生理指标差异,以期探讨不同 PEG 胁迫强度对燕麦生理指标的影响,初步揭示其生理适应机制,为今后系统、深入地研究燕麦抗旱调节机制和选育抗旱型经济作物提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试 6 个燕麦品种分别为“ESK 燕麦”“普兰顿燕麦”“甘早燕麦”“奥塔燕麦”“青海 444 燕麦”和“甜燕 1 号燕麦”,均由北京佰青源畜牧业科技发展有限公司提供。

1.2 试验方法

采用渗透试剂 PEG-6000(化学纯,平均分子量 5 400~7 800)模拟干旱胁迫。配制 PEG-6000 溶液浓度分别为 0%、11.9%、17.5%、21.8%、25%、31.6%,其渗透势对应为 CK 和 -0.2、-0.4、-0.6、-0.8、-1.2 MPa。每个品种均选取大小均匀一致、籽粒饱满的燕麦种子,用 0.3% KMnO₄ 溶液浸种 5 min 消毒后用蒸馏水冲洗 3 次晾干备用。每处理 3 次重复,每重复 100 粒种子均匀放置于铺有 2 层滤纸的发芽盒中,向发

芽盒中加入对应浓度的胁迫溶液 10 mL,对照(CK)以蒸馏水代替胁迫溶液,将发芽盒置于植物气候箱中进行培养。温度为 25~27 °C,光照强度 60~70 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度(55±10)%。每天对每一发芽盒定时补充等量蒸馏水。10 d 结束萌发后于每一重复获取 5 株长势均一、生长良好的燕麦幼苗剪取叶片部分用于生理指标测定。

1.3 项目测定

可溶性蛋白质(SP)含量的测定采用考马斯蓝亮 G-250 染色法;丙二醛(MDA)含量的测定参照硫代巴比妥酸(TBA)检测法;超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性以及过氧化物酶(POD)活性采用试剂盒法测定,试剂盒均由南京建成生物有限公司提供。所需上清液均按李合生^[13]方法制备,SOD、POD、CAT 活力值按试剂盒说明书操作、比色,运用试剂盒提供的公式计算得出。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件进行方差分析和主成分分析,采用 Excel 2003 和 GGE biplot V8.0 软件绘图。

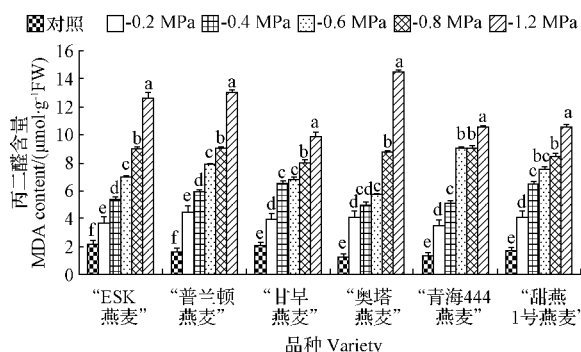
2 结果与分析

2.1 PEG 胁迫对燕麦幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

由图 1 可以看出,不同燕麦品种幼苗的丙二醛(MDA)含量随着 PEG 胁迫强度加剧呈现逐渐增加的趋势,6 个燕麦品种幼苗的 MDA 含量在 -1.2 MPa 胁迫处理时均达到峰值,其中“奥塔燕麦”的增幅最大,为 CK 的 11.27 倍;“甘早燕麦”增幅最小,仅为 CK 的 4.83 倍。

2.2 PEG 胁迫对燕麦幼苗可溶性蛋白质含量的影响

在整个 PEG 胁迫的过程中,6 个燕麦品种幼苗在不同 PEG 胁迫处理下可溶性蛋白质含量均呈现先升高后降低的趋势。由图 2 可知,6 个燕麦品种幼苗的可溶性蛋白质含量均在胁迫强度为 -0.4 MPa 时显著升高,在 -0.6 MPa 时达到最大值,之后随 PEG 胁迫强度的增加而降低,且显



注:不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters suggest significant difference in the same species by different treatments ($P < 0.05$), the same as below.

图1 PEG胁迫对不同燕麦品种幼苗丙二醛含量的影响
Fig. 1 Effect of PEG stress on malondialdehyde (MDA) content of different oat seedlings

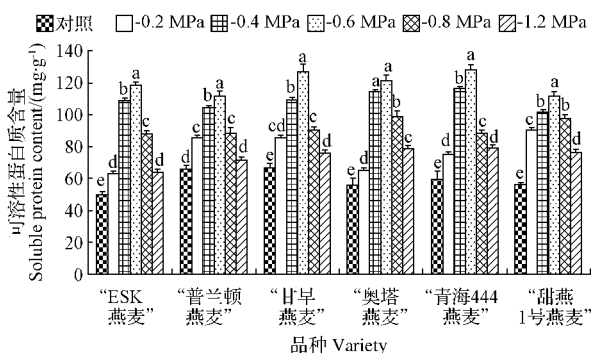


图2 PEG胁迫对不同燕麦品种幼苗可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 2 Effect of PEG stress on soluble protein content of different oat seedlings

著低于-0.6 MPa时。“ESK 燕麦”“普兰顿燕麦”“甘早燕麦”“奥塔燕麦”“青海444 燕麦”“甜燕1号燕麦”在-0.6 MPa胁迫处理时,可溶性蛋白质积累量分别是CK的2.37、1.69、1.91、2.16、2.17、1.98倍。

2.3 PEG胁迫对燕麦幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

6个燕麦品种幼苗的SOD活性随PEG胁迫程度加重呈先升后降趋势。由图3可知,不同燕麦品种的SOD活性受PEG胁迫影响的程度存在

差异,其中“普兰顿燕麦”“甘早燕麦”“奥塔燕麦”“青海444 燕麦”“甜燕1号燕麦”的SOD活性升高速度较快,均在-0.2 MPa胁迫时显著高于CK ($P < 0.05$),而“ESK 燕麦”与CK差异不显著;当胁迫浓度为-0.4 MPa时,各品种活性均达到峰值,且显著高于CK ($P < 0.05$);-1.2 MPa胁迫时“ESK 燕麦”“甘早燕麦”“青海444 燕麦”的SOD活性显著低于各组CK ($P < 0.05$),其余品种差异不显著。

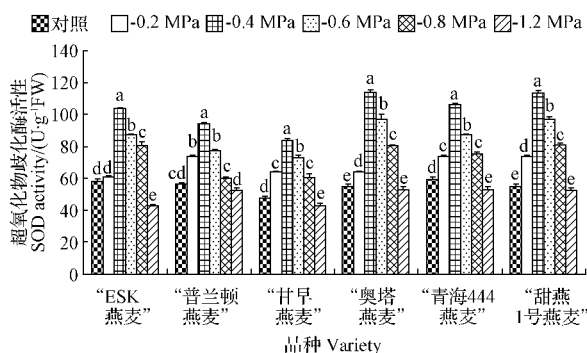


图3 PEG胁迫对不同燕麦品种幼苗超氧化物歧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of PEG stress on superoxide dismutase activity of different oat seedlings

2.4 PEG胁迫对燕麦幼苗过氧化物酶(POD)活性的影响

随着PEG胁迫强度增大,不同燕麦品种的POD活性均呈现先升高后降低的趋势(图4),并

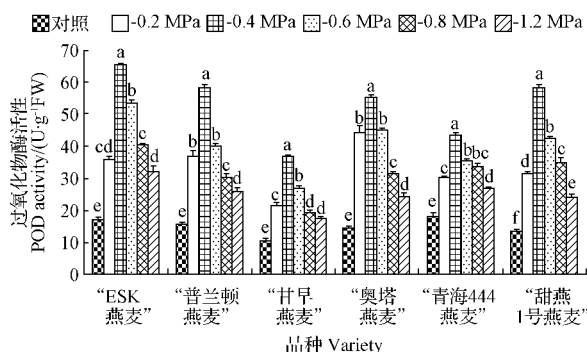


图4 PEG胁迫对不同燕麦品种幼苗过氧化物酶活性的影响

Fig. 4 Effect of PEG stress on peroxidase activity of different oat seedlings

且在 -0.4 MPa胁迫时达到最大值。由图 4 可知,不同 PEG 胁迫对 6 个燕麦品种幼苗的 POD 酶活性影响并不相同,仅“甜燕 1 号燕麦”的各 PEG 胁迫处理间差异显著($P < 0.05$)。在 -0.2 MPa和 -0.6 MPa胁迫时,“奥塔燕麦”增加幅度最大,分别为 CK 的 3.06 倍和 3.09 倍;在 -0.4 MPa和 -0.8 MPa胁迫时,“甜燕 1 号燕麦”增加幅度最大,分别为 CK 的 4.45 倍和 2.63 倍;在 -1.2 MPa胁迫时,“ESK 燕麦”增加幅度最大,是 CK 的 1.91 倍。

2.5 PEG 胁迫对燕麦幼苗过氧化氢酶(CAT)活性的影响

不同燕麦品种 CAT 活性随着 PEG 胁迫浓度增大呈先升后降趋势(图 5)。除“甜燕 1 号燕麦”“ESK 燕麦”外,其余品种各处理间差异显著($P < 0.05$)。6 个燕麦品种的 CAT 活性均在 -0.4 MPa胁迫时达到峰值,其中增幅排序为:“甜燕 1 号燕麦”>“奥塔燕麦”>“普兰顿燕麦”>“甘早燕麦”>“青海 444 燕麦”>“ESK 燕麦”。

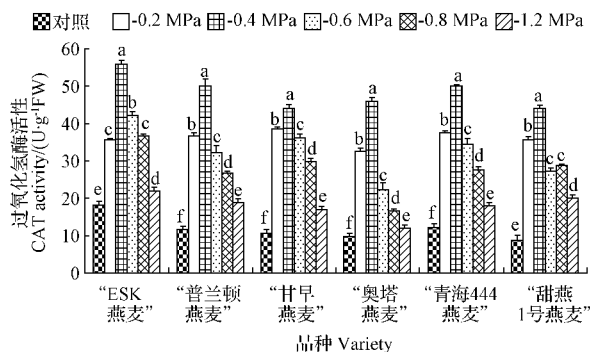
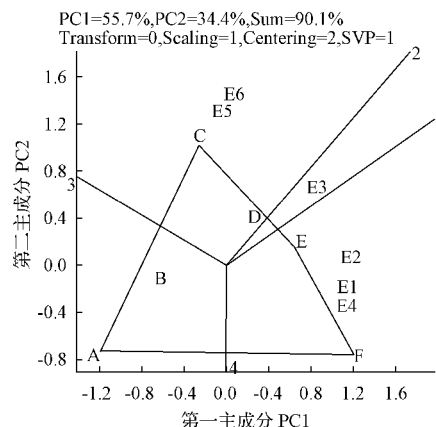


图 5 PEG 胁迫对不同燕麦品种幼苗过氧化氢酶活性的影响

Fig. 5 Effect of PEG stress on catalase activity of different oat seedlings

2.6 PEG 胁迫下不同处理环境与品种关系的 GGE 分析

由图 6 可见,第 1 主成分效应 $PC1=55.7\%$,第 2 主成分效应 $PC2=34.4\%$,可有效反映不同 PEG 环境处理下 90.1%的信息,根据累积贡献率大于 85%的原则,表明该数据真实可靠。为鉴别出不同 PEG 处理下表现最好的品种,以原点(0, 0)为中心向四边形各边作垂线,将整个双标图(图



注:A. “ESK 燕麦”;B. “普兰顿燕麦”;C. “甘早燕麦”;D. “奥塔燕麦”;E. “青海 444 燕麦”;F. “甜燕 1 号燕麦”;E1. 对照;E2. -0.2 MPa;E3. -0.4 MPa;E4. -0.6 MPa;E5. -0.8 MPa;E6. -1.2 MPa。下同。

Note: A. ‘ESK oats’; B. ‘Plantain oats’; C. ‘Dry oats’; D. ‘Otta oats’; E. ‘Qinghai oats’; F. ‘Sweet Yan No. 1’; E1. CK; E2. -0.2 MPa; E3. -0.4 MPa; E4. -0.6 MPa; E5. -0.8 MPa; E6. -1.2 MPa. The same as below.

图 6 品种-最佳适应 PEG 胁迫环境

Fig. 6 Variety-best adapted to PEG stress environment

6)分为 4 个扇区,不同 PEG 处理环境分别落于不同的扇区内,位于四边形顶角的品种为该 PEG 处理下表现最好的品种。由图 6 可直观看出,不同燕麦品种对 PEG 处理环境的特殊适应性存在差异,其中“甘早燕麦”在 E5 和 E6 环境下表现最好,“甜燕 1 号燕麦”在 E1、E2、E4 环境下均表现良好。

图 7 是用于直观评价试验环境区分力和代表性的 GGE 功能图。该 GGE 双标图中的小圆圈表示试验平均环境,而小圆圈的位置则取决于各个试验环境坐标的平均值。利用平均环境来代替目标环境,当带箭头的直线穿过平均环境和原点时就称为平均环境轴。其中,各个试验环境的区分能力大小由各试验环境向量长短来衡量,区分能力越大则向量长度越长,反之越小;而试验环境向量与平均环境向量的角度大小则用来度量目标环境的代表性强弱,代表性越弱则角度越大,反之越小。就区分能力而言,E5 和 E6 最好,E2、E3 次之,E1、E4 较弱;就代表性而言,E3 最好,E1、E2、E4 次之,E5、E6 较差。综合起来,E3 为最佳选择,这与抗氧化酶部分的分析结果相一致。综

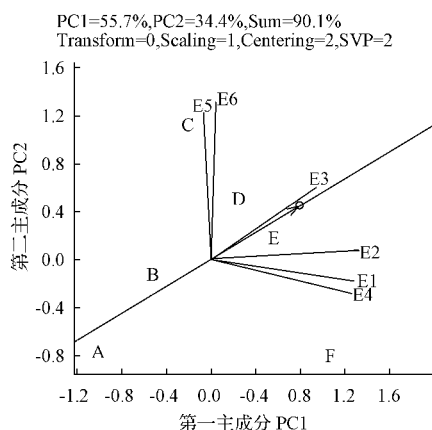


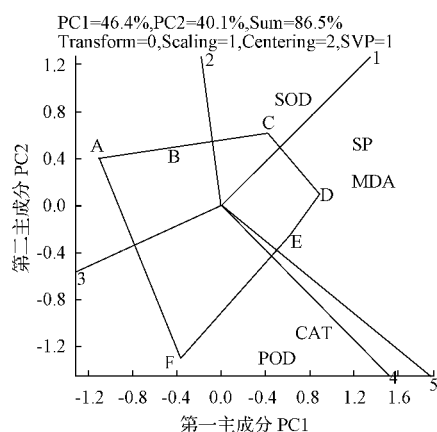
图7 胁迫环境的分辨力和代表性

Fig. 7 Discrimination and representativeness of stress environment

上推测 E3 环境即 -0.4 MPa 胁迫时为 6 种燕麦抗旱调节适应的较佳环境。

2.7 PEG 胁迫下不同生理指标与品种关系的 GGE 分析

在主成分分析的基础上,根据第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的值作双标图(图 8),可以反映不同生理测定指标与供试燕麦品种抗旱性之间的关系。由图 8 可知,不同燕麦品种和各



注:SP. 可溶性蛋白质;MDA. 丙二醛;SOD. 超氧化物歧化酶;CAT. 过氧化氢酶;POD. 过氧化物酶。

Note: SP. Soluble protein; MDA. Malondialdehyde; SOD. Superoxide dismutase; CAT. Catalase; POD. Peroxidase.

图8 不同品种与生理指标关系

Fig. 8 Correlation between different varieties and physiological indexes

项生理指标分别归入相应扇区,如 SOD 位于品种编号 C 所在的扇区,说明“甘早燕麦”在适应 PEG 胁迫的过程中,超氧化物歧化酶活性调节起主要作用;SP、MDA 与编号为 D、E 的品种位于同一扇区,表明“奥塔燕麦”“青海 444 燕麦”在 PEG 胁迫的适应过程中,丙二醛含量变化明显,可溶性蛋白质起主要的调节作用。CAT、POD 与 F 编号品种位于同一扇区,表明“甜燕 1 号燕麦”对 PEG 胁迫的适应主要由过氧化氢酶、过氧化物酶活性来调节。由此可见,6 个燕麦品种在受到 PEG 胁迫后是由不同的生理指标起主要调节作用来适应干旱逆境。

3 讨论

当植物组织处于严重干旱胁迫状态时,细胞内活性氧大量累积,生成具有强氧化性的脂质过氧化物和各种小分子的降解产物,其中以 MDA 含量升高最为明显,因而,MDA 含量是检测植物膜伤害的一个重要指标^[14]。该研究中 6 种燕麦幼苗 MDA 含量均表现出随胁迫强度加大而持续增加的相似性变化,这与赵丽丽等^[15]对金荞麦、裴帅帅等^[16]对谷子的研究结论相同,表明干旱程度加剧会导致植物幼苗的细胞膜受损伤程度愈加严重。

可溶性蛋白质是植物在代谢过程中产生的能够维持细胞内的渗透势,降低逆境对植物伤害的蛋白质^[17]。该研究发现,6 种燕麦的可溶性蛋白质含量在 -0.2 MPa 胁迫时开始升高,在 -0.6 MPa 达到峰值后开始下降。这与栓皮栎^[18]、葡萄^[19]、莖叶紫金牛^[20]等植物上的研究结果相类似。低渗透胁迫时蛋白质含量上升可能是植物体内通过合成一部分新蛋白来抵御干旱逆境,调节自身蛋白含量适应环境变化,以维持其细胞的正常功能而导致含量上升;当高渗透胁迫时水分亏缺严重,机体蛋白合成酶钝化,代谢受阻,从而使得蛋白含量下降。

植物体在长期进化过程中形成了包含 SOD、CAT、POD 在内的抗氧化酶防御系统,抗氧化酶活性能较好地反映植物对逆境的适应能力^[21],可清除活性氧,维持自由基生成与消除的动态平衡^[22]。抗氧化酶活性一方面可在逆境或衰老初期

表达,清除 H_2O_2 , 表现为保护效应;另一方面,也可在逆境或衰老后期表达,参与活性氧的生成并能引发膜脂过氧化作用,表现为伤害效应^[22]。该试验中 6 种燕麦幼苗的 SOD、CAT、POD 活性对干旱胁迫的响应大致相同,均随 PEG 胁迫浓度的升高表现出先升后降的趋势;在 $-0.4 \sim -0.2$ MPa 胁迫范围内随胁迫程度的加重持续上升,活性显著提高以清除活性氧,说明燕麦幼苗受到低浓度渗透胁迫后会增加抗氧化酶活性,这是植物细胞对外界胁迫的一种适应性反应;但随着干旱程度进一步加剧($-1.2 \sim -0.6$ MPa)抗氧化酶活性逐渐降低,表明胁迫程度过大会造成自由基产生与清除平衡失调,抗氧化系统受损,从而导致 SOD、CAT、POD 活性的降低^[23]。裴斌等^[24]对沙棘叶片抗氧化酶活性的研究也得到相似的结论。

传统的二维数据表难以将试验中各处理环境与品种间、测定指标与品种间的关系直观表述清楚。借助于 GGE 双标图不但可以清晰辨别各因素间的关系,而且可以把各因素间复杂的交互模式直观地表现出来,具有较强的便利性和直观性^[25-26]。GGE 双标图结果显示,不同燕麦品种适应 PEG 胁迫的作用指标各不相同:“甘早燕麦”通过 SOD 调节;“奥塔燕麦”“青海 444 燕麦”由 SP 和 MDA 调节适应;“甜燕 1 号燕麦”通过 POD、CAT 调节。这初步揭示出不同燕麦品种适应干旱的方式并非一致,印证了不同品种和作物适应干旱的方式是多样化的,一些品种和作物具有综合几种机制共同起作用的抗旱性的观点^[27]。在该研究中,“甘早燕麦”在 -1.2 、 -0.8 MPa 胁迫环境下表现突出,“甜燕 1 号燕麦”在 CK 和 -0.6 、 -0.2 MPa 胁迫环境下表现良好,推断出不同燕麦品种对 PEG 处理环境的适应性存在差异。这可能是不同品种在逆境胁迫下自我调节机制差异导致的。综合 GGE 双标图可知, -0.4 MPa 渗透胁迫环境具有较好的区分力和代表性,可作为燕麦生产的最佳胁迫强度和优良燕麦品种筛选的浓度。

4 结论

在低浓度 PEG 胁迫下,可有效提高燕麦幼苗活性氧清除系统中 SOD、POD 和 CAT 的活性,提高可溶性蛋白质含量,缓解干旱胁迫对燕麦幼

苗造成的膜脂过氧化伤害。不同品种的燕麦幼苗通过不同生理指标来调节适应干旱,其中 -0.4 MPa 胁迫浓度可作为燕麦生产过程中的最佳胁迫浓度,但影响燕麦生理变化的因素不仅与品种、测定指标有关,还与气候、土壤、种植方式以及栽培因素等密切相关。因此,要全面了解不同品种间的差异,还需进一步研究燕麦在多种条件下的抗旱调节机制。

参考文献

- [1] 刘建新,王金成,王瑞娟,等. 旱盐交叉胁迫对燕麦幼苗生长和渗透调节物质的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 244-248.
- [2] 罗佳,叶鸿程,刘兴林,等. 水分胁迫对燕麦生理指标的影响[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(3): 58-61.
- [3] 倪香艳,顾军强,钟葵,等. 燕麦品种的品质性状及聚类分析[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 18-24.
- [4] 陈新,宋高原,张宗文,等. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1188-1195.
- [5] 张娜,赵宝平,张艳丽,等. 干旱胁迫下燕麦叶片抗氧化酶活性等生理特性变化及抗旱性比较[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 166-171.
- [6] LAWLOR D W. Genetic engineering to improve plant performance under drought: Physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(1): 83-108.
- [7] 白向历,齐华,何萍,等. 水分胁迫对灌浆期燕麦叶片光合特性的影响[J]. 园艺与种苗, 2006, 26(1): 25-27.
- [8] 刘建新,王金成,王瑞娟,等. 干旱胁迫下一氧化氮对燕麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(2): 41-45.
- [9] 刘锦春, CORNELISSEN H C. CO_2 浓度变化下燕麦对干旱胁迫的生理响应[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1116-1123.
- [10] 姚玉波. 不同品种亚麻种子萌发期抗旱性鉴定[J]. 核农学报, 2015, 29(10): 2033-2039.
- [11] ASHRAF M. Inducing drought tolerance in plants: Recent advances[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(1): 169-183.
- [12] 贾寿山,朱俊刚,王曙光,等. 山西小麦地方品种萌发期的抗旱性[J]. 华北农学报, 2011, 26(2): 213-217.
- [13] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 贾利强. 金沙江热河谷造林树种抗旱特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [15] 赵丽丽,王普昶,陈超,等. 持续干旱对金荞麦生长、生理生态特性的影响及抗旱性评价[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 825-833.
- [16] 裴帅帅,尹美强,温银元,等. 不同品种谷子种子萌发期对干

旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. 核农学报, 2014, 28(10): 1897-1904.

[17] 许凯扬, 叶万辉, 段学武, 等. PEG 诱导水分胁迫下喜旱莲子草色生理适应性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2004, 30(3): 271-277.

[18] 吴敏, 张文辉, 周建云, 等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4223-4233.

[19] 胡宏远, 马丹阳, 李双岑, 等. 水分胁迫对赤霞珠葡萄主要抗旱生理指标及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 79-84.

[20] 代英超, 徐奎源, 马凯, 等. 珍稀濒危植物董叶紫金牛对持续干旱的生理响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2954-2959.

[21] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 651-657.

[22] 喻泽莉, 何平, 张春平, 等. 干旱胁迫对决明种子萌发及幼苗

生理特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 39-44.

[23] 张智猛, 戴良香, 宋文武, 等. 干旱处理对花生品种叶片保护酶活性和渗透物质含量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 133-141.

[24] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.

[25] 赵杰宏, 谢升东, 王轶, 等. GGE 双标图在中间香型烟叶特色彰显度分析中的应用[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(4): 28-34.

[26] 陈四龙, 李玉荣, 程增书, 等. 用 GGE 双标图分析种植密度对高油花生生长和产量的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(7): 1328-1335.

[27] 山仑, 陈培元. 旱地农业生理生态基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-17.

Physiological Response of Oat Seedlings to PEG Stress at Germination Stage

ZHANG Yujun¹, ZHAO Lili¹, CHEN Chao¹, WANG Puchang², LI Jiwei³

(1. College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. Guizhou Provincial Institute of Prataculture, Guiyang, Guizhou 550025; 3. Beijing Source of Green Animal Husbandry Science and Technology Development Co. Ltd., Peking 100010)

Abstract: In order to investigate the physiological and biochemical effects of different drought stress on Oat seedlings. To explore the mechanism of physiological response of oat seedlings to PEG stress at germination-stage, six oat varieties (*Anena sativa* L.) were subjected to different drought stress simulated by PEG. The results showed that the MDA content of seedlings of different oat varieties with PEG stress intensity increased the accumulation of cell membrane damage gradually increased; antioxidant enzyme activity and soluble protein content increased at low concentration stress, maintain the osmotic potential of cells, protect the cell membrane from injury, high stress concentration showed inhibitory effect and physiological serious destruction; combined with GGE-biplot, found that different oat varieties to adapt to the role of PEG-6000 stress physiological indicators are different: 'Sweet early oat' was regulated by SOD; 'Ota oat' and 'Qinghai 444 oat' were regulated by SP and MDA; 'Sweet Yan No. 1' was regulated by POD, CAT. The osmotic stress environment of -0.4 MPa had good regional component and representativeness, which could be used as the best stress intensity of oat production and the concentration of excellent oat varieties.

Keywords: oat; drought stress; physiological index; GGE-biplot