

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201612012

引文格式: 吴海英, 曹昀, 国志昌, 等. 淹水胁迫对藨草幼苗生长和生理的影响 [J]. 广西植物, 2017, 37(9):1161-1167

WU HY, CAO Y, GUO ZC, et al. Effects of waterlogging stress on growth and physiological characteristics of *Phalaris arundinacea* seedlings [J]. *Guihaia*, 2017, 37(9):1161-1167

## 淹水胁迫对藨草幼苗生长和生理的影响

吴海英<sup>1</sup>, 曹昀<sup>1,2\*</sup>, 国志昌<sup>1</sup>, 罗姗姗<sup>1</sup>, 纪欣圣<sup>3</sup>

( 1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 3. 江西师范大学 生命科学学院, 南昌 330022 )

**摘要:** 水深梯度是影响河湖水陆交错带植物生长发育和分布的关键生态因子。该研究以藨草幼苗为材料, 利用双套盆法, 设淹水梯度 0、10、20、30、40、50 cm 和全淹水以及对照(常规浇水)8 个处理组, 通过测定藨草的株高、叶片数、SPAD 值、MDA 含量、SOD、POD 及 CAT 活性、可溶性蛋白含量指标, 研究不同淹水深度下藨草的形态与生理特征变化。结果表明: 经过 36 d 淹水胁迫后, (1) 随淹水深度增加, 藨草的生长速度变慢, 叶片数减少, 叶绿素相对含量降低。(2) 随淹水时间的延长, 各淹水组 MDA 含量不断上升; 淹水 0~30 cm 深度, 藨草 SOD、POD 不断上升, 但 CAT 先升后降; 淹水 40~60 cm 深度, 藨草 SOD、CAT 不断上升, 但 POD 先降后升。(3) 可溶性蛋白含量虽随试验时间的延长不断上升, 但淹水逆境不是控制藨草可溶性蛋白含量的关键因素。淹水胁迫会对藨草生长造成伤害, 主要表现为生长速度减缓、膜脂过氧化程度加剧、抗氧化酶保护系统受到破坏、植株逐渐死亡。该研究结果为藨草资源的合理利用与开发提供了科学参考。

**关键词:** 藨草, 淹水胁迫, 形态特征, 抗氧化酶系统, 可溶性蛋白

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)09-1161-07

## Effects of waterlogging stress on growth and physiological characteristics of *Phalaris arundinacea* seedlings

WU Hai-Ying<sup>1</sup>, CAO Yun<sup>1,2\*</sup>, GUO Zhi-Chang<sup>1</sup>, LUO Shan-Shan<sup>1</sup>, JI Xin-Sheng<sup>3</sup>

( 1. College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China )

**Abstract:** The water depth gradient can be determined to be crucial ecology factor on controlling the growth and distribution of plant along with lake-land ecotone. In order to clarify the morphological and physiological characteristics of *Phalaris arundinacea* under different waterlogging depths, based on the *P. arundinacea* seedlings, the eight experi-

收稿日期: 2016-12-07 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(41361017); 江西省科技计划项目(20132BBF60079) [ Supported by the National Natural Science Foundation of China (41361017); Science and Technology Program of Jiangxi (20132BBF60079) ]。

作者简介: 吴海英(1993-), 女, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 从事植物生态与生态修复研究, (E-mail) wuwhy7@163.com。

\*通信作者: 曹昀, 博士, 副教授, 从事植物生态学研究, (E-mail) yun.cao@163.com。

mental groups [0, 10, 20, 30, 40, 50 cm, completely submerged and control (normal watering) groups] were set up by double basin method, and the plant height the number of leaves, the content of SPAD and MDA, the activity of SOD, POD and CAT, the content of soluble protein of *P. arundinacea* were measured respectively. The results were as follows: The experiment of waterlogging stress was conducted about 36 d, (1) The waterlogging stress could inhibit the growth of *P. arundinacea*, with the increasing of waterlogging depth, the growth rate slowed and the number of leaves and the chlorophyll relative content decreased. (2) With the waterlogging time extended, the MDA content of different waterlogging groups of *P. arundinacea* rised constantly; The waterlogging depth of 0–30 cm, SOD and POD contents increased gradually, while the CAT content increased firstly and then decreased; The waterlogging depth of 40–60 cm, the SOD and CAT contents raised, while the POD content decreased firstly and the increased. (3) The content of soluble protein was increased with the time extended, but the waterlogging stress was not determined to be key factor that had a considerable influence on the soluble protein content. *P. arundinacea* growth was damaged by waterlogging stress, mainly manifest the slowing of growth rate, the increase of membrane lipid peroxidation, the destruction of antioxidant enzyme system and the gradual death of plants. It can provide some scientific reference for effective exploitation and utilization of *P. arundinacea*.

**Key words:** *Phalaris arundinacea*, waterlogging stress, morphological characteristics, antioxidant enzyme system, soluble protein

淹水是植物在自然环境中经常遭受到的一种非生物胁迫,可导致植物生长受到伤害(Wang et al, 2016),如植物有氧呼吸受到抑制(Armstrong et al, 2009)、水下光合速率降低(Voesenek et al, 2006)、体内活性氧自由基的毒害作用加剧(王松, 2010)、植物内源激素的含量、合成及运输受到影响(姜玉萍等, 2013)。相关研究表明,当植物长期处于淹水环境下,自身会通过形态变化或生理生化机制的调节来适应淹水环境,缓解逆境损伤(张海燕等, 2014),如通过调节叶片厚度、形成地下茎或不定根等方式来获取更多氧气(卢妍, 2010; Barrett-Lennard, 2003);形成相应的抗氧化防御系统来减轻活性氧自由基的毒害作用(Islam & Macdonald, 2004);改变代谢途径和激素调节方式等(潘澜与薛立, 2012)。

藨草(*Phalaris arundinacea*)属冷季型多年生禾本科草本植物,主要分布于温带的潮湿环境或水湿区域(张宪春, 2004)。广泛用于人工湿地建设、农业面源污染、水土流失治理、水环境保护等方面(Vymazal & Kröpfelová, 2005; Březinová & Vymazal, 2015),同时可作为能源作物替代石油衍生燃料或化工原料(Aysu, 2012)。目前对藨草的逆境研究主要集中在重金属胁迫和极端土壤水分环境(Březinová & Vymazal, 2015; 国志昌等, 2016),而对藨草在淹水环境下的生

长与生理生化特征研究较少。本研究通过人工模拟淹水胁迫,研究藨草的生长与生理特征对淹水的响应及适应机制,旨在为藨草资源的合理开发及湿地恢复、湿地保育提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

2016年3月6日在鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区(116.32° E, 28.9° N)藨草的典型分布区采集藨草根状茎,选取大小均一的根状茎进行预培植,培养基质为pH 5.4、肥力中等的砂壤土。4月12日选取平均株高为59.2 cm的藨草,分别移植到试验盆(35 cm × 26 cm × 13 cm)内,每盆10株,共24盆。

### 1.2 试验处理

试验在植物阳光培养实验室进行,温度为(22±5)℃,光照为自然光照。试验时间为2016年4月13日至2016年5月19日,共36 d。采用双套盆法(宋家壮, 2011)(将试验盆放进高70 cm、上口径57 cm、下口径45 cm的塑料大桶中)进行试验。试验共设置7个淹水处理组:C1(淹水深度0 cm,即土壤水分达饱和状态,水分含量为50%)、C2(淹水深度10 cm)、C3(淹水深度20 cm)、C4(淹水深度30

cm)、C5(淹水深度 40 cm)、C6(淹水深度 50 cm)、C7(全淹水)以及 CK 组(对照组,常规浇水,其土壤水分含量为 30%),每处理设 3 个重复。自试验开始,每天观察各组的水位状况,定时(17:00)用量筒补充水量到淹水试验所设定的水位线。

### 1.3 测定指标和方法

藨草各指标测定时间为淹水 0 d(淹水前)、12 d(淹水初期)、24 d(淹水中期)和 36 d(淹水后期)。形态指标的测定:直尺测定叶片拉直后的株高,叶片数的测定为选取未发黄的藨草叶片。生理指标的测定:使用 SPAD-502 叶绿素仪测定藨草 SPAD 值(相对叶绿素含量);采用硫代巴比妥酸法测定藨草丙二醛(MDA)含量;采用氮蓝四唑(NBT)法测定藨草超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量(王学奎,2006)。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 21 软件进行数据统计分析,采用重复测量方差分析检验藨草各指标的差异显著性,用 LSD 检验法进行差异性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 淹水胁迫对藨草生长特征的影响

2.1.1 淹水胁迫对藨草株高的影响 相比淹水组,CK 组的藨草长势最好,株高增幅为 55.94%。淹水前与淹水后的藨草株高差异性显著( $P < 0.05$ )。淹水后,藨草随淹水深度的增加株高增势减小,C5、C6、C7 组株高变化幅度较小。试验结束时处理组株高增幅最大,为 48.33%,而 C6、C7 组株高增幅仅为 4.25%、3.17%(图 1)。通过重复方差分析,C2、C3、C4 组间无显著差异( $P > 0.05$ ),C5 组与 CK 组差异不显著( $P > 0.05$ ),其他各组之间则差异性显著( $P < 0.05$ )。

2.1.2 淹水胁迫对藨草叶片数的影响 CK 组叶片数随试验天数的增加不断增多,增幅为 44.20%。C1、C2 组藨草生长至淹水中期,叶片数增加,但淹水后期,新叶形成受阻,叶片数量减少,其余各淹水组随淹水时间的延长叶片数不断减少;其中,淹水初期,C1 组藨草叶片数增幅最大,为 18.24%,淹水结束,叶片数降幅 C7 组最大,为 45.6%(图 2)。通过重复

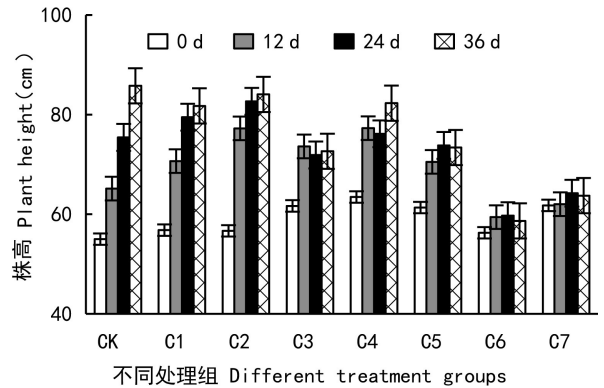


图 1 淹水胁迫对藨草株高的影响  
Fig. 1 Effects of waterlogging stress on plant height of *Phalaris arundinacea*

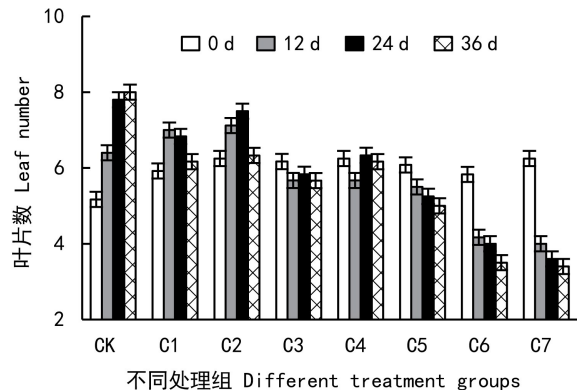


图 2 淹水胁迫对藨草叶片数的影响  
Fig. 2 Effects of waterlogging stress on leaf number of *P. arundinacea*

测量方差分析,淹水期间藨草叶片数变化差异显著( $P < 0.05$ ),淹水初期后各淹水组的叶片数变化无显著差异( $P > 0.05$ )。CK 组与淹水组之间差异显著( $P < 0.05$ );仅 C6、C7 组之间无显著差异( $P > 0.05$ )。

### 2.2 淹水胁迫对藨草 SPAD 值与 MDA 含量的影响

2.2.1 淹水胁迫对藨草 SPAD 值的影响 CK 组藨草的 SPAD 值持续上升,增幅为 10.52%,而各淹水组随着淹水时间的延长,SPAD 值基本呈下降趋势。淹水组之间,C4、C6 组与其它组均差异显著( $P < 0.05$ ),但 C1、C7 组以及 C2、C3、C5 组之间差异不显著( $P > 0.05$ );淹水组内,藨草淹水前的 SPAD 值与淹水期间存在显著差异性( $P < 0.05$ ),其中,C6 组在淹水后期 SPAD 值降幅最大,为 33.85%(图 3)。通

过重复测量方差分析,淹水组除 C1、C7 组外,其它各组均与 CK 组存在显著性差异( $P<0.05$ )。

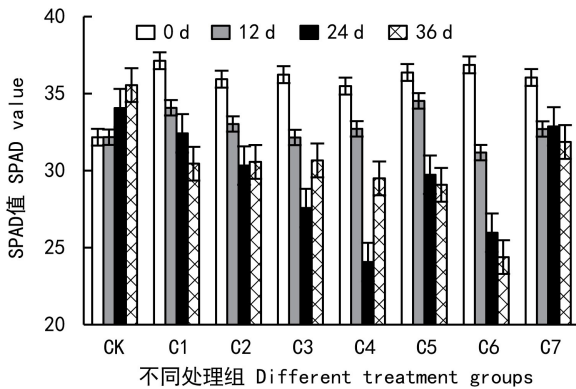


图 3 淹水胁迫对藨草 SPAD 值的影响

Fig. 3 Effects of waterlogging stress on SPAD of *Phalaris arundinacea*

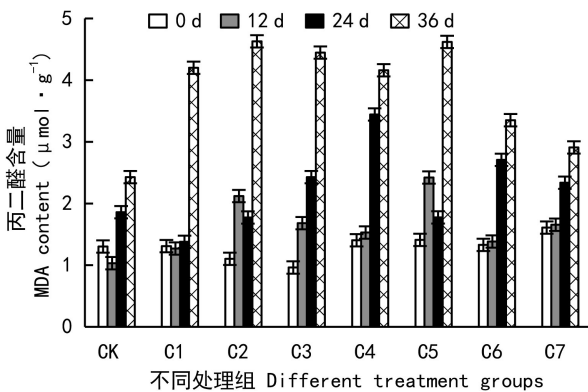


图 4 淹水胁迫对藨草 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of waterlogging stress on MDA of *Phalaris arundinacea*

2.2.2 淹水胁迫对藨草 MDA 含量的影响 淹水前,藨草各处理组的 MDA 含量相差不大。淹水后,各淹水组 MDA 含量随淹水时间的增加而增大;淹水后期,藨草 MDA 含量均达最大值且显著高于 CK 组。淹水初期, C1 组的 MDA 含量变化最小,为 2.98%;淹水后期,各淹水组中 C2 组 MDA 含量最高,高出 MDA 含量最小的 C7 处理组 59.11% (图 4)。通过各处理组不同时间段的藨草 MDA 含量重复测量方差分析得出,淹水前与淹水期各阶段的藨草 MDA 含量变化差异性显著( $P<0.05$ );CK 组与各淹水组间均有显著差异性( $P<0.05$ )。

## 2.3 淹水胁迫对藨草抗氧化酶活性的影响

2.3.1 淹水胁迫对藨草 SOD 活性的影响 随淹水时间的增加,各淹水组的 SOD 活性不断升高的同时存在特例,其中, C7 组的 SOD 活性呈现先降低后升高的趋势。淹水组的 SOD 活性变化幅度显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。淹水初期,各处理组的藨草 SOD 活性均低于淹水前, C4 组的 SOD 活性变化最大,降幅为 72.37%;淹水中期至后期, C1 组 SOD 活性增幅最大,为 173.38%;淹水后期, C1 组 SOD 活性最高,而 C4 组活性最低(图 5:a)。重复测量方差分析得出,淹水后期的藨草 SOD 活性较其它时间段有显著差异性( $P<0.05$ ),且各处理组之间 SOD 活性差异性显著( $P<0.05$ )。

2.3.2 淹水胁迫对藨草 POD 活性的影响 随着淹水时间的增加, C2、C3、C4、C7 组藨草 POD 活性不断升高,而 C1、C5、C6 组的 POD 活性为先降低后升高。试验结束时淹水组 SOD 活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。淹水初期,除 C1 与 C5 组外,其余各组 POD 活性均高于淹水前, C1、C5 组 POD 活性降幅分别为 25.5%、24.5%。淹水后期, C7 组的 POD 活性变化最大,增幅为 227.71% (图 5:b)。重复测量方差分析得出,各时间段内藨草 POD 活性在淹水中期与后期变化无显著差异性( $P>0.05$ ),且在淹水初期,淹水组 POD 活性与 CK 组无显著差异( $P>0.05$ )。CK 组与各淹水组均差异性显著( $P<0.05$ )。

2.3.3 淹水胁迫对藨草 CAT 活性的影响 随淹水时间的增加, C1、C2、C3、C4 组 CAT 活性先升后降, C5、C6、C7 组 CAT 活性不断上升。淹水中后期,各淹水组 CAT 活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。与淹水前相比, C1 组在淹水初期 CAT 活性降幅最大,为 59.71%。淹水中期, C3 组 CAT 活性最大, C7 组活性最小。淹水后期, C7 组 CAT 活性最大, C2 组活性最小(图 5:c)。通过重复测量方差分析,藨草的 CAT 活性变化在淹水前与淹水各时间段内之间都存在显著差异性( $P<0.05$ ),且各处理组之间差异性也较显著( $P<0.05$ )。

## 2.4 淹水胁迫对藨草可溶性蛋白含量的影响

随着时间的延长,各处理组可溶性蛋白含量不断上升。淹水组的可溶性蛋白含量与 CK 组变化趋势基本一致。试验结束, C3 组可溶性蛋白含量变化最大,与淹水前的可溶性蛋白含量相比,增幅为



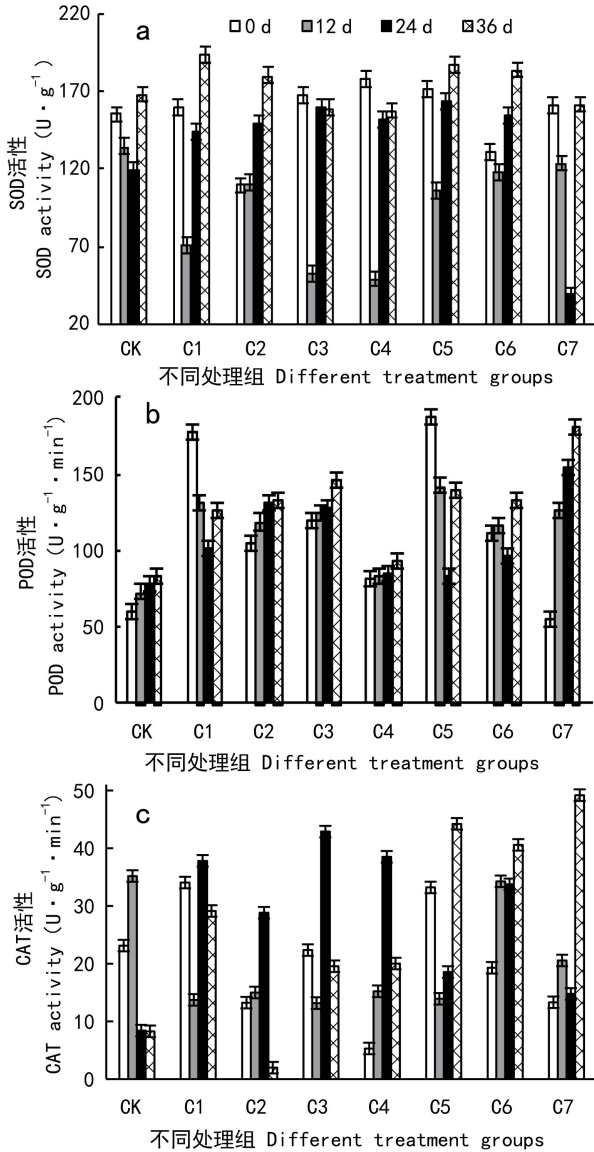


图 5 淹水胁迫对藨草抗氧化酶的影响

Fig. 5 Effects of waterlogging stress on antioxidantase of *Phalaris arundinacea*

61.66% (图 6)。通过重复测量方差分析可得出,各时间段藨草的蛋白质含量变化无显著差异性 ( $P > 0.05$ ); 而各处理间, C3 组与其余各组之间差异性较显著 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 藨草形态特征对淹水胁迫的响应

各淹水组中, 淹水深度 0~10 cm 处的藨草株高

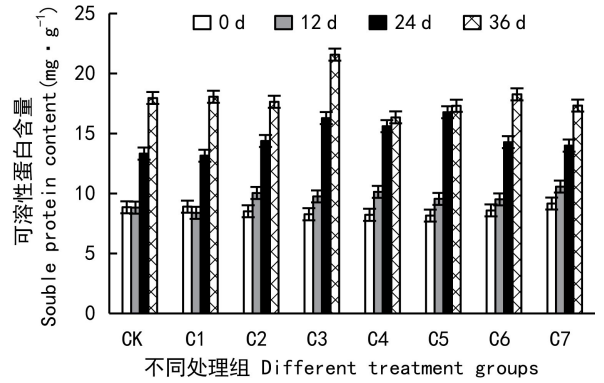


图 6 淹水胁迫对藨草可溶性蛋白的影响

Fig. 6 Effects of waterlogging stress on soluble protein of *Phalaris arundinacea*

增长最快; 但各淹水组在淹水中后期, 随淹水深度的加剧, 生长明显滞缓, 植株高度变化不大, 说明淹水胁迫对藨草幼苗的生长与株高有明显的抑制。这与已有研究所认为的一般情况下逆境胁迫强, 株高生长就慢, 甚至会停止生长结果一致 (王哲宇, 2014)。相关研究表明, 淹水深度会影响植物叶片数的变化, 造成叶片脱落 (李翔和赵金萍, 2010)。本研究中, 0~24 d, 0~10 cm 的低淹水深度环境中, 藨草随株高的增长, 有新叶形成, 叶片数增多; 但随着淹水胁迫时间的延长, 各淹水组的新叶形成受阻, 叶片数减少, 且淹水越深, 藨草叶片数脱落越多, 全淹条件下的藨草叶片数量最少。

### 3.2 藨草生理特征对淹水胁迫的响应

各淹水组因受水分胁迫的影响, 藨草随淹水时间的增加, SPAD 值下降越大, 这与淹水对早稻剑叶的影响研究结果相似 (姬静华等, 2016)。全淹组的藨草在淹水中期和后期, SPAD 值略微浮动, 原因可能是藨草在全淹情况下所产生的形态等变化使得光合作用维持在了一定的水平 (吴麟等, 2012)。

植物衰老过程以及在逆境环境遭受伤害时, 往往会启动细胞的膜脂过氧化作用, 而膜脂氧化的最终产物 MDA 会严重损伤植物的生物膜, 因此 MDA 的积累在一定程度上不仅反映植物体内自由基活动的状态, 还反映了植物遭受逆境伤害的程度 (Armstrong & Drew, 2002)。整个淹水期, 藨草的 MDA 含量显著高于对照组, 并随着淹水时间的延长, MDA 含量不断增加, 膜脂氧化程度进一步加剧,

藨草生长所遭受的逆境伤害程度不断加大。本研究结论与淹水对灰化苔草幼苗生长的影响结果相似(曹昀等,2016)。

在正常的代谢过程(如呼吸与光合作用)中,植物体内的氧会被活化形成活性氧(ROS),ROS此时为低水平产生;但当受到生物或非生物胁迫时,体内ROS生成与清除之间的动态平衡打破,致使ROS大量积累,对植物造成毒害作用(Polle,2001)。而植物为维持生长,免受氧化胁迫损害,会通过抗氧化酶系统和非酶系统共同参与来清除体内过量的ROS。SOD、POD、CAT是抗氧化酶系统中的重要保护酶(卢妍,2010)。SOD是抵御ROS自由基介导的氧化损伤的第一道防线,能够催化超氧物阴离子自由基,歧化为 $H_2O_2$ 和 $O_2$ ;生成的 $H_2O_2$ ,在POD与CAT的共同催化下,歧化为 $O_2$ 和 $H_2O$ (Terzi & Kadioglu,2006)。本研究结果显示,随淹水时间的延长,藨草体内SOD、POD、CAT三者变化复杂,在0~30 cm淹水深度,藨草SOD、POD不断增加,但CAT先升后降;在40~60 cm淹水深度,藨草SOD、CAT不断增加,但POD先降后升。淹水中后期,各淹水组的藨草SOD活性与POD活性不断上升,但藨草的受淹叶片枯黄脱落,未淹叶片失绿变棕褐色,叶片下垂;茎部变软;在淹水后期,各淹水组藨草SOD活性,CAT活性达最大,但此时藨草已基本无生命特征。究其原因主要如下:(1)藨草的MDA水平升高,体内膜脂氧化程度的加剧使保护酶活性超出清除活性氧的生理耐受性范围,保护酶活性受到抑制,淹水胁迫对藨草的生长造成伤害(詹嘉红等,2010);(2)POD作用效果具有双重性:一方面可在逆境或衰老初期表达,清除 $H_2O_2$ ,为保护效应;另一方面POD也可参与活性氧的生成、叶绿素的降解,并能引发膜脂过氧化作用,为伤害效应,是植物体在逆境或衰老后期表达衰老到一定阶段的产物(杨淑慎与高俊凤,2001)。淹水后期,各淹水组的POD活性均达到最大值,根据后期藨草的生长状况,说明藨草在逆境胁迫条件下,POD主要表现为伤害效应,其加剧了淹水胁迫对藨草生长的抑制作用。

可溶性蛋白含量代表氮代谢的水平,参与各种生理代谢过程,与植物的生长密切相关(贾丽,2015)。本研究中,淹水组藨草可溶性蛋白含量的

变化与对照组一致,随试验时间的延长,可溶性蛋白含量不断上升。已有研究表明,在逆境胁迫下蛋白质合成会受到抑制,可溶性蛋白含量往往会下降(肖祥希等,2006),本研究可溶性蛋白质含量出现的异常结果说明,藨草的可溶性蛋白含量不受淹水逆境的影响。

## 参考文献:

- ARMSTRONG W, WEBB T, DARWENT M, et al, 2009. Measuring and interpreting respiratory critical oxygen pressures in roots [J]. *Ann Bot*, 103 (2): 281-293.
- AYSU T, 2012. Supercritical fluid extraction of reed canary grass (*Phalaris arundinacea*) [J]. *Biomass Bioen*, 41(2): 139-144.
- ARMSTRONG W, DREW M, 2002. Root Growth and Metabolism Under Oxygen Deficiency [M]. Florida: CRC Press: 729-761.
- BARRETT-LENNARD EG, 2003. The interaction between waterlogging and salinity in higher plants: causes, consequences and implications [J]. *Plant Soil*, 253 (1): 35-54.
- BŘEZINOVÁ T, VYMAZAL J, 2015. Seasonal growth pattern of *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands with horizontal subsurface flow [J]. *Ecol Eng*, 80:62-68.
- BEZINOVÁ T, VYMAZAL J, 2015. Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland [J]. *Ecol Eng*, 79(3):94-99.
- CAO Y, ZHENG X, YANG Y, et al, 2016. Effect of waterlogging on the growth and antioxidant enzyme activity of *Carex cinerascens* seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 35 (12): 3273-3278. [曹昀, 郑祥, 杨阳, 等, 2016. 淹水对灰化苔草幼苗生长及抗氧化物酶活性的影响 [J]. *生态学杂志*, 35 (12): 3273-3278.]
- GUO ZC, CAO Y, CHEN BX, et al, 2016. Water ecological amplitude of *Phalaris arundinacea* at rhizomatic germination and seedling stage [J]. *Guihaia*, 36(8): 1000-1007. [国志昌, 曹昀, 陈冰祥, 等, 2016. 根茎萌发与幼苗期的藨草水分生态幅 [J]. *广西植物*, 36(8): 1000-1007.]
- ISLAM MA, MACDONALD SE, 2004. Ecophysiological adaptations of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to flooding [J]. *Trees-Struct Funct*, 18 (1): 35-42.
- JIANG YP, HAO T, ZOU YJ, et al, 2013. Advance of researching into the plant growth and development as influenced by waterlogging and the plant adaptive mechanism [J]. *Acta Agric Shanghai*, 29(6): 146-149. [姜玉萍, 郝婷, 邹宜静, 等, 2013. 淹水对植物生长发育的影响及适应机理的研究进展 [J]. *上海农业学报*, 29(6): 146-149.]
- JI JH, HUO ZG, TANG LS, et al, 2016. Grain yield and quality and physiological and biochemical characteristics of flag leaf in

- early rice as affected by submergence at filling stage [J]. *Chin J Rice Sci*, 30(2): 181–192. [姬静华, 霍治国, 唐力生, 等, 2016. 早稻灌浆期淹水对剑叶理化特性及产量和品质的影响 [J]. *中国水稻科学*, 30(2): 181–192.]
- JIA L, 2015. Responses mechanism of antioxidant defense system of *Artemisia frigida* Willd to mechanical damage [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University. [贾丽, 2015. 冷蒿抗氧化防御系统对机械损伤的响应机制 [D]. 杭州: 浙江农林大学.]
- LU Y, 2010. Response mechanism of wetland plants to submerged conditions [J]. *J Nat Dis*, 19(4): 147–151. [卢妍, 2010. 湿地植物对淹水条件的响应机制 [J]. *自然灾害学报*, 19(4): 147–151.]
- LI X, ZHAO JP, 2010. Effects of continuous waterlogging on morphological and some physiological indexes of *Amygdalus persica* L. seedling [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 40(15): 129–130. [李翔, 赵金萍, 2010. 连续淹水对毛桃幼苗形态及部分生理指标的影响 [J]. *现代农业科技*, 40(15): 129–130.]
- PAN L, XUE L, 2012. Plant physiological mechanisms in adapting to waterlogging stress; a review [J]. *Chin J Ecol*, 31(10): 2662–2672. [潘澜, 薛立, 2012. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展 [J]. *生态学杂志*, 31(10): 2662–2672.]
- POLLE A, 2001. Dissecting the superoxide dismutase-ascorbate-glutathione-pathway in chloroplasts by metabolic modeling computer simulations as a step towards, flux analysis [J]. *Plant Physiol*, 126(1): 445–62.
- TERZI R, KADIOGIU A, 2006. Drought stress tolerance and the antioxidant enzyme system in *Ctenanthe setosa* [J]. *Acta Biol Cracov Ser Bot*, 48(2): 89–96.
- VOESENEK L, COLMER TD, PIERIK R, et al, 2006. How plants cope with complete submergence [J]. *New Phytol*, 170(2): 213–226.
- VYMAZAL J, KRÖPFELOVÁ L, 2005. Growth of *Phragmites australis*, and *Phalaris arundinacea*, in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic [J]. *Ecol Eng*, 25(5): 606–621.
- WANG X, HUANG M, ZHOU Q, et al, 2016. Physiological and proteomic mechanisms of waterlogging priming improves tolerance to waterlogging stress in wheat (*Triticum aestivum* L) [J]. *Environ Exp Bot*, 132: 175–182.
- WANG XK, 2006. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press: 167–191. [王学奎, 2006. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社: 167–191.]
- WANG ZY, 2014. Research on physiological characters of nine woody plants seedlings under waterlogging stress [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University. [王哲宇, 2014. 九种木本植物幼苗的淹水胁迫生理特征研究 [D]. 南京: 南京林业大学.]
- WU L, ZHANG WW, GE XM, et al, 2012. A review of the response mechanisms of plants to waterlogging stress [J]. *World For Res*, 25(6): 27–33. [吴麟, 张伟伟, 葛晓敏, 等, 2012. 植物对淹水胁迫的响应机制研究进展 [J]. *世界林业研究*, 25(6): 27–33.]
- XIAO XX, LIU XH, YANG ZW, et al, 2006. Effect of aluminum on the content of protein and nucleic acid of longan (*Dimocarpus longan*) seedling [J]. *Sci Sil Sin*, 42(10): 24–30. [肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 等, 2006. 铝胁迫对龙眼幼苗蛋白质和核酸含量的影响 [J]. *林业科学*, 42(10): 24–30.]
- YANG SS, GAO JF, 2001. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 21(2): 36–41. [杨淑慎, 高俊凤, 2001. 活性氧、自由基与植物的衰老 [J]. *西北植物学报*, 21(2): 36–41.]
- ZHANG XC, 2002. Flora of China [M]. Beijing: Science Press: 177. [张宪春, 2002. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社: 177.]
- ZHANG HY, WANG TH, LU JJ, 2014. Comparative study on the adaptability of *Alnus trabeculosa* and *Phragmites australis* in tidal wetland [J]. *J East Chin Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2014(1): 107–115. 张海燕, 王天慧, 陆健健, 2014. 江南桤木与芦苇在潮滩湿地的适应性对比研究 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 107–115.]
- ZHAN JH, LIN JP, LAN ZH, 2010. Effects of waterlogging stress on the activity of some protective enzymes in *Panicum repens* [J]. *Biotechnology*, 20(2): 67–69. [詹嘉红, 林建平, 蓝宗辉, 2010. 淹水胁迫对铺地黍几种保护酶活性的影响 [J]. *生物技术* 20(2): 67–69.]