

DOI:10.11686/cyxb2016159

http://cyxb.lzu.edu.cn

侯晓龙, 蔡丽平, 韩航, 周垂帆, 王果, 刘爱琴. 铅胁迫对百喜草叶绿素荧光特性及酶活性的影响. 草业学报, 2017, 26(3): 142-148.

HOU Xiao-Long, CAI Li-Ping, HAN Hang, ZHOU Chui-Fan, WANG Guo, LIU Ai-Qin. Effect of lead stress on the chlorophyll fluorescence characteristics and antioxidative enzyme activities of *Paspalum notatum*. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(3): 142-148.

# 铅胁迫对百喜草叶绿素荧光特性及酶活性的影响

侯晓龙<sup>1,2,3</sup>, 蔡丽平<sup>1,2</sup>, 韩航<sup>1,2</sup>, 周垂帆<sup>1,2</sup>, 王果<sup>2</sup>, 刘爱琴<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002;  
3. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福建 福州 350002)

**摘要:**为探讨水土保持草种在重金属污染矿山废弃地植被恢复中应用的可行性,以南方地区水土流失治理中广泛应用的草种百喜草为试验材料,设置不同 Pb 浓度(150,250,500,1000,1500 和 2500 mg/kg)的室内土培模拟胁迫试验,定量测定不同 Pb 胁迫浓度、不同胁迫时间百喜草的叶绿素荧光、SPAD 值、叶绿素含量、抗氧化酶活性及 MDA 含量等指标,分析百喜草对 Pb 胁迫的生理响应。结果表明,在试验初期(8 月),Pb 胁迫对百喜草的叶绿素荧光特性具有一定抑制作用,但随胁迫时间的增加,在试验后期(9 和 10 月)则表现出显著的促进作用( $P<0.05$ );Pb 胁迫对百喜草 SPAD 值和叶绿素含量有一定抑制作用,但作用并不显著( $P>0.05$ );Pb 胁迫对百喜草的 POD 和 SOD 活性均具有一定促进作用,但对百喜草 CAT 活性无显著影响( $P>0.05$ );铅胁迫增大百喜草体内 MDA 含量,但高浓度 Pb 胁迫(1500 和 2500 mg/kg)条件下,百喜草体内 MDA 含量与对照无显著差异( $P>0.05$ )。以上结果表明,Pb 胁迫对百喜草生理特性有一定抑制作用,但抑制作用并不显著。百喜草可通过提高叶绿素荧光特性和抗氧化酶(POD 和 SOD)活性,减轻 Pb 胁迫的危害,以适应 Pb 胁迫逆境环境。

**关键词:**百喜草;Pb 胁迫;叶绿素;抗氧化酶;丙二醛

## Effect of lead stress on the chlorophyll fluorescence characteristics and antioxidative enzyme activities of *Paspalum notatum*

HOU Xiao-Long<sup>1,2,3</sup>, CAI Li-Ping<sup>1,2</sup>, HAN Hang<sup>1,2</sup>, ZHOU Chui-Fan<sup>1,2</sup>, WANG Guo<sup>2</sup>, LIU Ai-Qin<sup>1,2\*</sup>

1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Cross—Strait Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** *Paspalum notatum* is considered one of the best grass species for controlling soil and water loss in south China. To test the feasibility of *P. notatum* as a restoration plant in mining wasteland, a pot experiment was undertaken with various concentrations of lead (Pb) (150, 250, 500, 1000, 1500 and 2500 mg/kg). Chlorophyll fluorescence, SPAD value, chlorophyll content, antioxidative enzyme activities and malondialdehyde content were measured to investigate physiological responses to Pb stress. The inhibitory effect of Pb stress on chlorophyll fluorescence was observed at the early stage (August), while significant promotion was found at later stages (September and October). Pb stress inhibited the SPAD value of chlorophyll and the chlorophyll content of *P. notatum*, but no significant differences from the control were observed. Pb stress promoted the

收稿日期:2016-04-12;改回日期:2016-06-28

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02),国家自然科学基金(41401364),国家林业局林业公益性行业科研项目(201304303)和农业高校产学研合作科技重大项目(2013N5002)资助。

作者简介:侯晓龙(1981-),男,山西永济人,副教授,博士。E-mail: lxyhxl@126.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fjlaq@126.com

activities of peroxidase and superoxide dismutase, but showed little effect on catalase activity. Malondialdehyde content of *P. notatum* increased under Pb stress, but there were no significant differences from the control at higher Pb concentrations. These results demonstrate that Pb stress inhibits some physiological characteristics in *P. notatum* and that the antioxidant system and chlorophyll fluorescence may play important roles in alleviating Pb toxicity.

**Key words:** *Paspalum notatum*; lead stress; chlorophyll; antioxidative enzyme; malondialdehyde

矿山开采废弃地的治理已经成为当前世界许多国家急需解决的重要环境问题,其中,矿山废弃地土壤重金属污染问题受到普遍关注,而 Pb 是最常见的土壤重金属污染元素之一,土壤 Pb 污染问题一直为环境界研究的热点<sup>[1-2]</sup>。重金属污染植物修复技术应用的前提是发现重金属富集植物,由于 Pb 具有较高的负电性,易与土壤中的有机质和铁锰氧化物形成共价键,不易被植物吸收,因此,目前国内外发现的 Pb 富集植物极少<sup>[3]</sup>。

百喜草(*Paspalum notatum*)——禾本科雀稗属植物,具有耐贫瘠、抗干旱、覆盖性好、须根发达、固地性强等特点,是一种抗逆性较强的植物,在南方水土流失治理中有广泛的应用<sup>[4]</sup>。百喜草对逆境具有一定耐性,可利用其粗壮的匍匐茎快速扩展,显现出强大的竞争力<sup>[5]</sup>。夏汉平等<sup>[6]</sup>研究发现,百喜草在纯尾矿或由尾矿和垃圾组成的混合基质上正常生长,比香根草(*Vetiveria zizanioides*)具有更强的重金属抗性。庞玉建<sup>[7]</sup>研究表明,百喜草可在 Cu、Zn 复合污染环境中生长,而且对 Cu 和 Zn 具有一定富集能力。百喜草对 Pb 胁迫具有一定耐性,在土壤 Pb 浓度 2500 mg/kg 条件下仍可生长,铅胁迫对百喜草分蘖能力、根系形态等生长指标有一定抑制作用,但对株高抑制作用不明显,且对不同植物部位生长影响存在一定差异<sup>[8]</sup>。龙健等<sup>[9]</sup>研究发现,百喜草可在重金属含量极高的铜尾矿生长,且对重金属的抗性高于苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)、黑麦草(*Lolium perenne*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)。但百喜草是否存在对 Pb 胁迫的特殊生理响应机制尚不清楚,限制了其在 Pb 污染土壤治理中的应用。

鉴于此,本研究以南方主要的水土保持草种百喜草为研究对象,设置不同 Pb 浓度的胁迫试验,测定不同 Pb 胁迫条件下,百喜草的叶绿素荧光、SPAD 值、叶绿素含量、抗氧化酶活性及丙二醛(malonaldehyde,MDA)含量等指标,分析百喜草对 Pb 胁迫的生理响应,为百喜草在 Pb 污染土壤中的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试百喜草种子购买自深圳鑫森森园林草坪有限公司,种子的发芽率 85%,含水量 0.01%,千粒重 25 g。选取均匀饱满的百喜草种子,在人工气候箱中进行发芽,培养供试百喜草植株。试验基质采用黄心土和河沙(可减少其他元素对试验的影响)按体积比 4:1 混合,黄心土采自福州林地自然土壤,河沙采自福州乌龙江。黄心土风干后过 5 mm 的尼龙筛,然后与晾干的河沙混合。基质的 pH 为 5.49,有机质、全 N、全 P 和全 K 含量分别为:17.51 g/kg、0.22 g/kg、0.03 g/kg 和 35.16 g/kg;水解性 N、有效 P 和速效 K 含量分别为:0.05 mg/kg、0.05 mg/kg 和 42.64 mg/kg;Pb、Zn、Cu 和 Cr 含量分别为:0.85 mg/kg、3.95 mg/kg、3.10 mg/kg 和 0.40 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用塑料桶作为培养容器,培养桶直径 27 cm,高 30 cm。基质填充高度为 27 cm(共计 8 kg,以干土计),留 3 cm 无 Pb 的缓冲层(重 1.5 kg,以干土计)。根据南方铅锌矿区土壤 Pb 含量情况和我国土壤环境质量标准(GB 15618-1995)<sup>[10]</sup>,设计 6 个 Pb 浓度的单因素重复胁迫试验处理:150、250、500、1000、1500 和 2500 mg/kg,分别标记为: BH<sub>1</sub>、BH<sub>2</sub>、BH<sub>3</sub>、BH<sub>4</sub>、BH<sub>5</sub> 和 BH<sub>6</sub>,同时设置不施加 Pb 的对照(CK),每个处理 5 个重复。Pb 的施加用醋酸铅[(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Pb·3H<sub>2</sub>O],胁迫试验前一次性均匀混入相应处理培养桶的基质中。

2012 年 6 月 15 日,选择长势一致、高 10 cm、生长良好的百喜草植株,分别移栽至所设置不同 Pb 浓度胁迫处理的培养桶中心。每个培养桶移栽百喜草幼苗 2 株,移栽过程注意保持根系自然伸展。试验在玻璃温室中(昼/

夜:温度 23.0 °C/29.3 °C,湿度 42.7%/67.7%)进行。为保证植株生长过程中对其他养分的需求,每 7 d 浇一次 1/4 营养液 100 mL,每 3 d 浇去离子水 100 mL。营养液采用 Hoagland 配方,调节营养液 pH 为 5.5。2012 年 10 月 15 日完成试验,收获植株。

### 1.3 试验测定方法

**1.3.1 叶绿素荧光** 分别在 8—10 月,每月中旬选择晴朗无风的天气,采用美国 OP 公司生产的 OP-30P 型便携式叶绿素荧光仪,测定百喜草第 3 片叶的荧光特性,叶片先暗适应 20 min,然后测定初始荧光  $F_0$ 、最大荧光  $F_m$ ,计算 PSⅡ 最大光化学效率  $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$  和 PSⅡ 潜在活性  $F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$ 。

**1.3.2 叶片 SPAD 值** 分别在 8—10 月,每月中旬选择晴朗无风的天气,用日本产美能达 SPAD 502 plus 叶绿素仪,随机选择百喜草植株中部不同方位的 5 片叶子,测定 SPAD 值,每片叶 3 次读数,取平均值。

**1.3.3 叶绿素含量** 叶绿素含量测定采用朱广廉等<sup>[11]</sup>的乙醇—丙酮提取法。在胁迫的 90 d 后,选择各处理位置一致的新鲜百喜草 3 片叶进行叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量的测定。

**1.3.4 酶活性** 在胁迫 90 d 后,称取 0.2 g 百喜草叶片于预冷的研钵中,加入 1 mL 预冷的磷酸缓冲液,在冰浴上研磨成浆,然后转入到 10 mL 离心管中,再分别用 1 mL 缓冲液冲洗研钵 3 次,冲洗液全部转入离心管中,最终体积为 4 mL。然后在 4 °C 下 10000 r/min 离心 20 min,取上清液定容至 10 mL,于 4 °C 下低温保存,作为待测液,用于过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和丙二醛(MDA)含量的测定。POD 活性采用愈创木酚法进行测定<sup>[12]</sup>;SOD 活性采用氮蓝四唑法进行测定<sup>[12]</sup>;CAT 活性采用紫外吸收法测定<sup>[12]</sup>;MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定<sup>[13]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用 IBM SPSS 17.0 软件进行数据处理,用 Origin 7.5 软件作图。数据为 5 个重复的平均值±标准差。多重比较采用 Tukey 法( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 Pb 胁迫对百喜草叶绿素荧光特性的影响

由图 1 可知,Pb 胁迫条件下,在胁迫试验初期(8 月)百喜草叶片各荧光参数均小于无 Pb 对照,但除 250 mg/kg 处理的  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$ ,以及 1000 mg/kg 处理的  $F_0$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  外,其他均与对照无显著差异( $P > 0.05$ );在胁迫试验中期(9 月),不同 Pb 浓度的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  均与不施 Pb 对照差异不显著( $P > 0.05$ );胁迫末期(10 月),百喜草叶片在 1000 mg/kg 处理的初始荧光  $F_0$ ,以及各 Pb 浓度胁迫处理的最大荧光  $F_m$ 、PSⅡ 最大光化学效率和 PSⅡ 潜在活性均显著大于不施 Pb 对照( $P < 0.05$ );百喜草的叶绿素荧光各参数,在同一胁迫浓度,不同胁迫时间基本表现为逐渐增大的趋势。说明 Pb 胁迫初期对百喜草的叶绿素荧光具有一定抑制作用,但随着其逐渐适应 Pb 胁迫环境,在胁迫试验后期,对百喜草荧光特性的促进作用越来越明显。

### 2.2 Pb 胁迫对百喜草叶片 SPAD 值的影响

由图 2 可知,百喜草叶片 SPAD 值,除 150 mg/kg 处理在 10 月份略大于对照外,其他不同 Pb 浓度胁迫、不同胁迫时间均小于对照;随 Pb 胁迫浓度的增大,百喜草 SPAD 值在胁迫初期(8 月)和中期(9 月)呈先增大后减小的趋势,而在胁迫后期(10 月)则呈现出先减小后略有增大的趋势;随胁迫时间的增加,低浓度 Pb 胁迫处理( $< 500$  mg/kg),百喜草叶片 SPAD 值表现为逐渐增大的趋势,在 500 mg/kg 处理表现为先增大后减小,而高浓度铅胁迫处理( $> 500$  mg/kg),则表现为先减小后增大的趋势;但除 1500 mg/kg 处理在胁迫初期(8 月)和中期(9 月)显著小于对照外( $P < 0.05$ ),其他处理的 SPAD 值均与对照无显著差异( $P > 0.05$ )。说明 Pb 胁迫对百喜草叶片 SPAD 值影响较小。

### 2.3 Pb 胁迫对百喜草叶绿素含量的影响

由表 1 可知,Pb 胁迫条件下,百喜草叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均小于对照,但除 150 mg/kg 处理的叶绿素总量显著小于对照外,其他均与对照无显著差异( $P > 0.05$ );百喜草叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均随

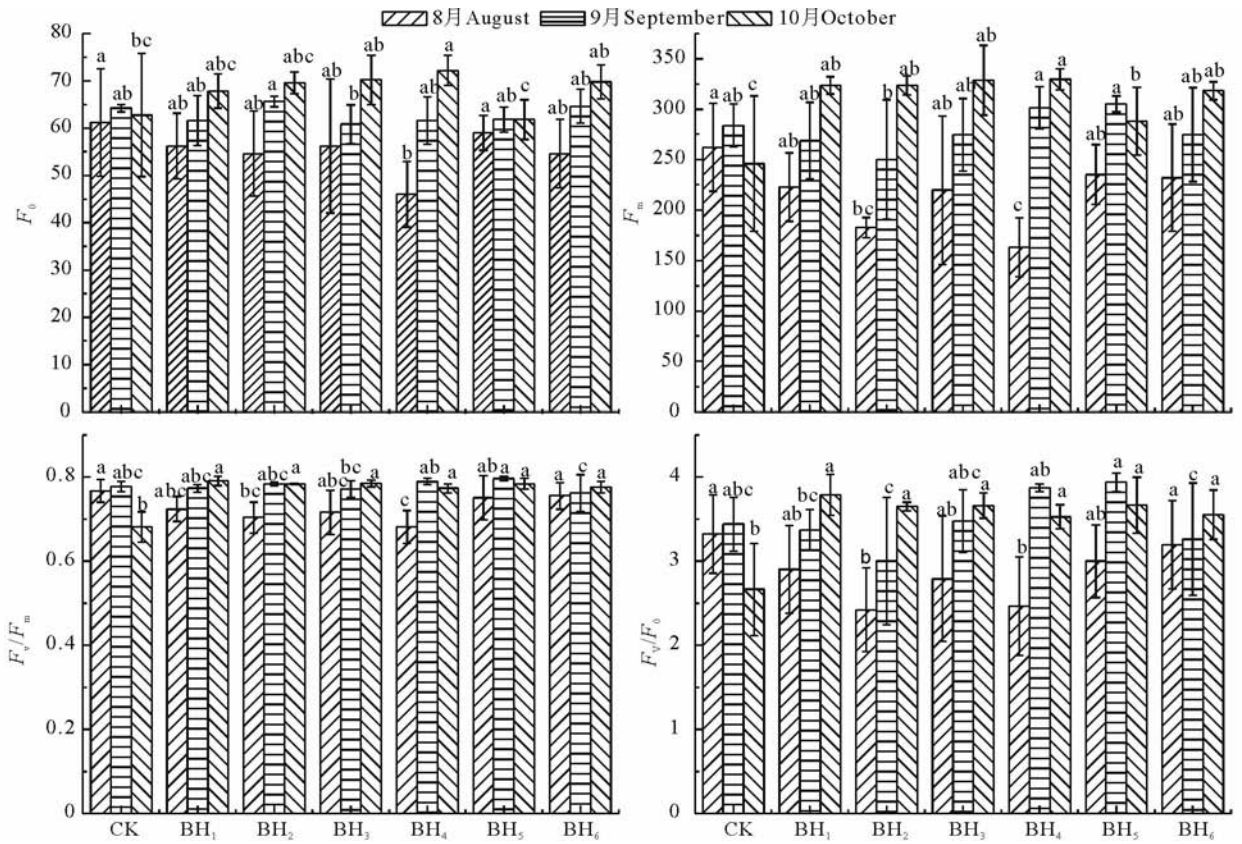


图 1 不同 Pb 胁迫处理百喜草叶片荧光特性

Fig. 1 Chlorophyll fluorescence parameters of *P. notatum* under different Pb stress

同一胁迫时期不同 Pb 胁迫浓度处理出现相同字母表示  $P=0.05$  水平上差异不显著。Different level of soil Pb concentration at the same stress stage, bars with the same letter are not significantly different based on par-wise T-test at 5% level of significance.  $F_0$ : 初始荧光 Initial fluorescence;  $F_m$ : 最大荧光 Maximum fluorescence;  $F_v/F_0$ : PSII 潜在活性 Potential activity;  $F_v/F_m$ : PSII 最大光化学效率 The maximum PSII photochemical efficiency; BH<sub>1</sub>, BH<sub>2</sub>, BH<sub>3</sub>, BH<sub>4</sub>, BH<sub>5</sub>, BH<sub>6</sub> are 150, 250, 500, 1000, 1500, 2500 mg/kg Pb. 下同 The same below.

Pb 胁迫浓度的增大呈逐渐增大的趋势;百喜草叶片叶绿素 a/b,在 Pb 浓度 500、1500 和 2500 mg/kg 处理大于无 Pb 对照,其他处理则小于对照,但均与对照无显著差异( $P>0.05$ )。

#### 2.4 Pb 胁迫对百喜草叶片抗氧化酶活性的影响

由表 2 可知,低 Pb 浓度(150 mg/kg)和高 Pb 浓度(大于 1500 mg/kg)处理百喜草叶片 POD 活性小于对照,但其他处理则显著大于对照( $P<0.05$ );不同 Pb 胁迫处理百喜草叶片 SOD 活性均大于对照,其中 150、250 和 500 mg/kg 处理显著大于对照( $P<0.05$ );Pb 胁迫条件下,百喜草叶片 CAT 活性均小于对照,其中 Pb 胁迫浓度小于 500 mg/kg 处理显著小于对照,而大于 1000 mg/kg 处理则与对照无显著差异( $P>0.05$ );在 Pb 胁迫浓度 150~500 mg/kg 范围,随 Pb 胁迫浓度的增大,百喜草叶片 POD 和 SOD 活性呈逐渐增大的趋势,500 mg/kg 后呈逐渐减小的趋势。说明低浓度铅胁迫条件下,百喜草可通过提高叶片 POD 和 SOD 活性,从而适应 Pb 胁迫环境,但高浓度 Pb 胁迫环境对其叶片 POD 活性有显著抑制作用,但对 CAT 活性

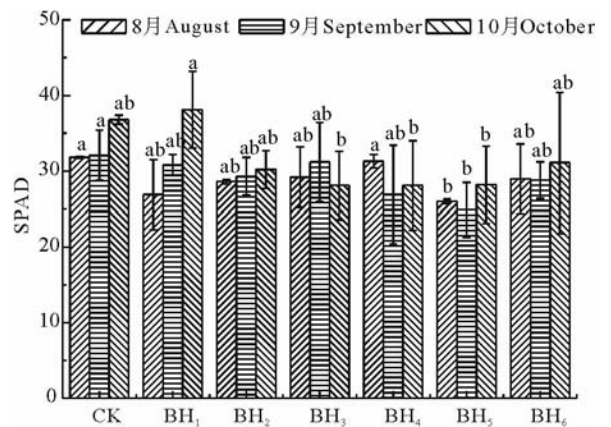


图 2 不同 Pb 胁迫处理百喜草叶片 SPAD 值

Fig. 2 SPAD of *P. notatum* under different Pb stress

逐渐增大的趋势,500 mg/kg 后呈逐渐减小的趋势。说明低浓度铅胁迫条件下,百喜草可通过提高叶片 POD 和 SOD 活性,从而适应 Pb 胁迫环境,但高浓度 Pb 胁迫环境对其叶片 POD 活性有显著抑制作用,但对 CAT 活性

影响较小。

2.5 Pb胁迫对百喜草叶片MDA含量的影响

由图3可知,随Pb胁迫浓度的增大,百喜草叶片MDA含量呈先增大后减小的趋势,在500 mg/kg处理达最大;除1500 mg/kg处理外,其他处理百喜草叶片MDA含量均大于对照,但除500 mg/kg处理显著大于对照外,其他处理均与对照无显著差异( $P>0.05$ )。说明铅胁迫对百喜草具有一定毒害作用,但影响并不显著。

3 讨论

重金属胁迫对一般植物的生长及生理生化特性具有抑制作用,而耐性植物可以通过自身生理特性的改变,以适应胁迫环境<sup>[14]</sup>。叶绿素荧光作为光合作用的探针,不仅能反映光能吸收、激发能传递和光化学反应等光合作用过程,而且与ATP合成和CO<sub>2</sub>固定等过程有关,几乎所有光合作用过程的变化可通过叶绿素荧光反映出来。本研究发现Pb胁迫初期对百喜草的叶绿素荧光特性具有一定抑制作用,但随胁迫时间的增加促进作用越来越明显,且随Pb胁迫浓度的增大,其叶绿素荧光特性呈逐渐增大的趋势。李朝阳等<sup>[15]</sup>研究表明,湿地匍灯藓在Pb胁迫初期可通过应激性增加PSⅡ活性来抵御重金属的毒害,但由于电子传递和热耗散能力较弱,使PSⅡ活性中心受损,最终导致光合系统损伤。李亚藏等<sup>[16]</sup>研究发现铅污染对山梨叶绿素荧光特性有促进作用,本研究与这些研究结果存在一些不同之处,说明不同植物对重金属胁迫的荧光特性响应存在一定差异,表明百喜草可通过叶绿素荧光特性的改变适应高浓度Pb胁迫,可能是其对Pb胁迫的重要响应机理,但其从初期抑制到后期促进明显的转变过程及机理尚不清楚,有待进一步试验研究。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,在光合作用的光吸收中起核心作用,叶绿素具有解毒、抗病等多种用途。本研究发现,Pb胁迫对百喜草叶绿素含量无显著抑制作用,随Pb胁迫浓度的增大呈增大的趋势;冯鹏等<sup>[17]</sup>研究发现,Pb胁迫条件下,随Pb胁迫浓度的增大,黑麦草叶片叶绿素含量呈递增趋势,本研究结果与此一致。而刘大林等<sup>[18]</sup>研究表明,随Pb胁迫时间的延长,早熟禾(*Poa annua*)叶绿素含量呈先升后降的趋势。本研究结果与此有一定差异,说明不同植物对Pb胁迫的响应存在一定差异,特别是耐性植物对Pb胁迫具有特殊的适应策略。

表 1 不同胁迫处理百喜草叶片叶绿素含量  
Table 1 Chlorophyll content of *P. notatum* under different Pb stress

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a (mg/g)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg/g)	叶绿素总量 Total chlorophyll (mg/g)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
CK	5.06±1.17a	1.11±0.65a	6.16±1.81a	5.13±1.46a
BH <sub>1</sub>	3.13±1.06a	0.73±0.10a	3.86±0.99b	4.42±1.81a
BH <sub>2</sub>	3.65±0.86a	0.90±0.37a	4.55±1.02ab	4.40±1.55a
BH <sub>3</sub>	3.91±0.71a	0.81±0.23a	4.72±0.51ab	5.36±2.70a
BH <sub>4</sub>	3.53±0.65a	0.72±0.06a	4.25±0.70ab	4.93±0.64a
BH <sub>5</sub>	4.59±1.07a	0.83±0.21a	5.41±2.13ab	5.65±2.52a
BH <sub>6</sub>	4.74±0.91a	0.87±0.11a	5.62±0.86ab	5.54±1.62a

注:同一列数据后出现相同小写字母者表示在 $P>0.05$ 水平上差异不显著,下同。  
Note: Column data followed same letters indicate no significant difference at  $P>0.05$ . The same below.

表 2 不同 Pb 胁迫处理百喜草叶片抗氧化酶活性  
Table 2 Antioxidative enzyme activities of *P. notatum* under different Pb stress

处理 Treatment	POD	SOD	CAT
CK	123.63±19.99d	28.01±3.19c	54.90±2.44a
BH <sub>1</sub>	66.99±14.93de	291.62±71.58b	28.76±4.51b
BH <sub>2</sub>	369.85±60.40b	336.09±7.87ab	25.08±2.41b
BH <sub>3</sub>	857.98±30.36a	347.97±7.45a	11.64±1.85c
BH <sub>4</sub>	291.37±72.33c	35.01±2.34c	53.69±0.83a
BH <sub>5</sub>	11.66±4.75e	33.82±1.99c	53.79±2.14a
BH <sub>6</sub>	41.45±22.49e	42.98±12.58c	50.15±6.25a

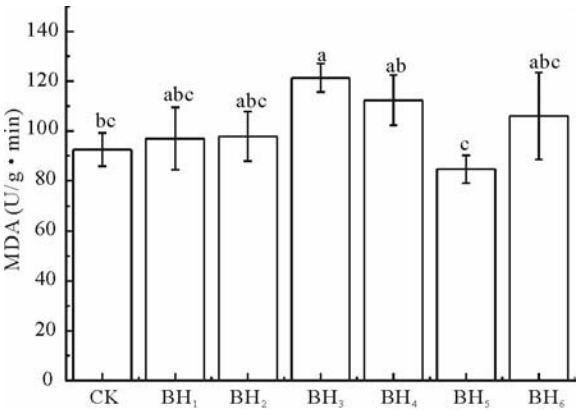


图 3 不同 Pb 胁迫处理百喜草叶片MDA含量  
Fig. 3 MDA content of *P. notatum* under different Pb stress

抗氧化酶系统可清除植物自身有氧代谢过程中产生的活性氧,对提高植物抗逆性具有重要作用<sup>[19]</sup>。本研究发现 Pb 胁迫对百喜草叶片 POD 和 SOD 活性具有一定促进作用,但 Pb 浓度大于 1500 mg/kg 后抑制作用明显。说明耐性植物可以通过提高抗氧化酶活性,从而适应 Pb 胁迫环境,但其通过自身生理调节适应有一定限度。赵钢等<sup>[20]</sup>研究发现,随 Pb 胁迫浓度的增加,苦荞(*Fagopyrum tataricum*)体内丙二醛、超氧阴离子自由基含量均逐渐增加。低浓度 Pb 胁迫促进苦荞 SOD、POD 和 CAT 活性,但随 Pb 胁迫浓度的增大,各项指标均显著下降。朱启红等<sup>[21]</sup>研究表明,Pb 胁迫条件下,蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris*)体内 POD 和 CAT 活性在胁迫初期明显升高,但随胁迫浓度的增大,两种酶的活性则呈下降趋势,而 SOD 活性和叶绿素含量则呈下降趋势。本研究结果与这些研究结果一致,说明低浓度 Pb 胁迫条件下,耐性植物可通过提高抗氧化酶活性,从而达到对 Pb 胁迫的解毒,但高浓度 Pb 胁迫条件下,对其叶片抗氧化酶活性有一定抑制作用。百喜草可适应高浓度的 Pb 胁迫条件,其可能通过酶活性的改变影响其他形态或生理指标,从而实现其对高浓度 Pb 的适应或解毒,但其转变过程及其机理还有待进一步研究。

#### 4 结论

1) Pb 胁迫初期对百喜草的叶绿素荧光特性具有一定抑制作用,但随胁迫时间的增加,则逐渐表现出促进作用,且促进作用越来越明显;Pb 胁迫对百喜草 SPAD 值和叶绿素含量有一定抑制作用,但作用不显著,且百喜草叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均随 Pb 胁迫浓度的增大呈逐渐增大的趋势。

2) Pb 胁迫对百喜草的 POD 和 SOD 活性具有一定促进作用,但 Pb 浓度大于 1500 mg/kg 后则表现出显著抑制作用;高浓度 Pb 胁迫对百喜草 CAT 活性无显著影响;Pb 胁迫条件下百喜草体内 MDA 含量提高,但高浓度 Pb 胁迫处理 MDA 含量与对照无显著差异。

3) 百喜草可通过提高叶绿素荧光特性和抗氧化酶(POD 和 SOD)活性,减轻 Pb 胁迫的危害,以适应 Pb 胁迫逆境环境。

#### 参考文献 References:

- [1] Zhang A X, Nie Y N, Ji H B, *et al.* Spatial distribution, fractionation and pollution assessment of heavy metals in Wanzhuang Gold Mining field in upstream part of water conservation area of Beijing, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2321-2328.  
张爱星, 聂义宁, 季宏兵, 等. 北京市水源涵养区上游万庄金矿田土壤重金属空间分布、形态特征及污染评价. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2321-2328.
- [2] Bou Kheir R, Shomar B, Greve M B, *et al.* On the quantitative relationships between environmental parameters and heavy metals pollution in Mediterranean soils using GIS regression-trees: The case study of Lebanon. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 147(6): 250-259.
- [3] Cho Y S, Bolick J A, Butcher D J. Phytoremediation of lead with green onions (*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns (*Pteris cretica* cv Mayii). *Microchemical Journal*, 2009, 91(1): 6-8.
- [4] Wang L, Liu R, Li W H, *et al.* Effects of stresses of different heavy metals on growth and chlorophyll fluorescence of *Scendesmus obliquus*. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5): 743-747.  
王琳, 刘冉, 李文慧, 等. 不同重金属离子胁迫对斜生栅藻生长及叶绿素荧光特性的影响. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(5): 743-747.
- [5] Xu Z R, Chen S P, Xu Z T, *et al.* The characters of bahia grass and its potential application. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2014, 29(3): 25-33.  
许泽荣, 陈世平, 徐泽堂, 等. 百喜草的特性与应用前景. *草业与畜牧*, 2014, 29(3): 25-33.
- [6] Xia H P, Su W S. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1121-1129.  
夏汉平, 束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与其吸收差异研究. *生态学报*, 2001, 21(7): 1121-1129.
- [7] Pang Y J. Cu Tolerance and Accumulation of *Festuca arundinacea*, *Paspalum notatum* and *Cynodon dactylon* under the Stress of Cu and Cu-Zn[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2009.  
庞玉建. 狗牙根、苇状羊茅和百喜草对 Cu 及 Cu-Zn 复合污染的耐性和积累性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2009.
- [8] Hou X L, Liu A Q, Cai L P, *et al.* Effects of Pb stress on growth and Pb accumulation of *Paspalum notatum*. *Journal of Ag-*

ro-Environment Science, 2014, 33(12): 2303-2308.

侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平, 等. Pb 胁迫对百喜草生长和 Pb 积累的影响. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2303-2308.

- [9] Long J, Huang C Y, Teng Y, *et al.* Resistance to heavy metals by several forage grass and its microbial effects from copper mine tailings. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 159-164.
- 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 几种牧草对铜尾矿重金属的抗性及其微生物效应. 环境科学学报, 2004, 24(1): 159-164.
- [10] GB15618-1995, Environmental Quality Standard for Soils[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- GB15618-1995, 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [11] Zhu G L, Zhong H W, Zhang A Q. Plant Physiology Experiments[M]. Beijing: Peking University Press, 1990: 245-248.
- 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 245-248.
- [12] Zhang Z L. Experimental Instruction of Plant Physiology[M]. Second Edition. Beijing: China Higher Education Press, 1990: 154-155.
- 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 154-155.
- [13] Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiment[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2000: 175-177.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 175-177.
- [14] Martínez-Fernández D, Walker D J, Romero-Espinar P, *et al.* Physiological responses of *Bituminaria bituminosa* to heavy metals. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(18): 2206-2211.
- [15] Li Z Y, Wu H, Tian X R, *et al.* Fluorescent characteristics of chlorophylls in *Plagiomnium acutum* under Cd and Pb stresses. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(1): 49-56.
- 李朝阳, 吴昊, 田向荣, 等. Cd、Pb 胁迫下湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*)叶绿素荧光特性研究. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 49-56.
- [16] Li Y Z, Liang Y L, Wang Q C. Influence of Pb on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in *Pyrus ussuriensis* and *Malus baccata*. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 21-25.
- 李亚藏, 梁彦兰, 王庆成. 铅对山梨和山荆子光合作用和叶绿素荧光特性的影响. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 21-25.
- [17] Feng P, Sun L, Shen X H, *et al.* Response and enrichment ability of perennial ryegrass under lead and cadmium stresses. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 153-162.
- 冯鹏, 孙力, 申晓慧, 等. 多年生黑麦草对 Pb、Cd 胁迫的响应及富集能力研究. 草业学报, 2016, 25(1): 153-162.
- [18] Liu D L, Yang J Q, Liu Z M, *et al.* Effects of cadmium and lead stress of physiological characters of *Poa pratensis* seedlings. Pratacultural Science, 2015, 32(2): 224-230.
- 刘大林, 杨俊俏, 刘兆明, 等. 镉、铅胁迫对草地早熟禾幼苗生理的影响. 草业科学, 2015, 32(2): 224-230.
- [19] Foyer C H, Descourvoeres P, Kunert K J. Protection against oxygen radicals: An important defense mechanism studied in transgenic plants. Plant Cell Environment, 1994, 17(5): 507-523.
- [20] Zhao G, Zou L, Peng L X, *et al.* Effects of lead stress on the physiological characteristics of Buckwheat. Jiangsu Agriculture Science, 2012, 40(7): 98-100.
- 赵钢, 邹亮, 彭镰心, 等. 铅胁迫对苦荞生理特性的影响. 江苏农业科学, 2012, 40(7): 98-100.
- [21] Zhu Q H, Xia H X. Effects of lead stress on antioxidant enzyme system and chlorophyll content of *Pteris vittata*. Guizhou Agricultural Science, 2012, 40(4): 56-58.
- 朱启红, 夏红霞. 铅胁迫对蜈蚣草抗氧化酶系统和叶绿素含量的影响. 贵州农业科学, 2012, 40(4): 56-58.