

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2016.04.019

# 不同土壤水分条件下铅胁迫对白羊草种子和幼苗的影响

王敏<sup>1</sup>, 王进鑫<sup>\*1</sup>, 王榆鑫<sup>1</sup>, 宋清玉<sup>2</sup>, 李春燕<sup>1</sup>, 陈科皓<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**针对我国西北地区铅锌矿区存在的干旱和铅污染交互胁迫的情况,以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为研究对象,通过试验模拟方法分析不同土壤水分条件下铅胁迫对白羊草种子发芽率、发芽势以及幼苗根长、苗长、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明:单一的土壤水分条件和铅胁迫处理对白羊草种子萌发和幼苗生长均存在抑制作用,发芽率、根长和苗长的抑制效应顺序为根长>苗长>发芽率。水分和铅交互胁迫对白羊草 SOD、POD 和 CAT 活性的影响规律不明显,表现出一定的协同或拮抗效应;而 MDA 含量与对照组相比则显著增加( $P<0.05$ ),表明交互胁迫对白羊草生物膜系统造成了一定的伤害。综合分析说明,白羊草对水分和铅交互胁迫具有一定的耐受性(土壤相对含水量 70%,铅含量  $700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下仍能存活并生长),而且适当的交互胁迫(土壤相对含水量 92.6%,铅含量  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )可以促进白羊草种子的萌发和幼苗的生长。因此,白羊草可以作为西北地区铅锌矿区生态系统修复的先锋草本植物。

**关键词:**土壤水分;铅;白羊草;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2016)04-0841-08

## Effects of Lead Stress on Seed and Seedling of *Bothriochloa ischaemum* under Different Soil Moisture

WANG Min<sup>1</sup>, WANG Jin-xin<sup>\*1</sup>, WANG Yu-xin<sup>1</sup>, SONG Qing-yu<sup>2</sup>, LI Chun-yan<sup>1</sup>, CHEN Ke-hao<sup>3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of soil and water conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** For the case of interactive stress of drought and lead on the lead-zinc mining district of northwestern China, the objective of this experiment was to study changes in the seed germination rates, germination potentials, root length, germ length, POD, SOD, CAT activity and MDA content of *Bothriochloa ischaemum* under lead stress with different soil moisture. The results showed that only soil moisture or only Pb stress had inhibition effect on the seed and seedling of *B. ischaemum*. The inhibition orders were root length>germ length> germination rates. The combination of drought and Pb stress had less effect than only soil moisture or Pb stress on POD, SOD and CAT activity in *B. ischaemum*, and it had either synergistic or antagonistic effect depending on the conditions. However, the MDA content increased significantly than the control treatment, it indicated that the interactive effect of drought and lead stress caused some damage to the biofilm system of *B. ischaemum*. In summary, *B. ischaemum* was resistant to the combined effects of Pb and moisture (it still survived in the condition of 70% of soil water content and  $700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Pb). Appropriate combined effects (92.6% of soil water content and  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Pb) promoted seed germination and seedling growth of *B. ischaemum*. So *B. ischaemum* could be used as pioneer herb to repair the lead-zinc mining district of northwestern China.

**Key words:** Soil moisture; Lead; *Bothriochloa ischaemum*; Seed germination; Seedling growth

收稿日期:2015-01-15;修回日期:2015-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31170579)和国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金博导项目(20110204110009)资助

作者简介:王敏(1989-),女,汉族,山东滨州人,在读硕士,主要从事生态环境工程研究,E-mail:shdwangmin@126.com;\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: jwang118@126.com

铅是一种对生态环境有严重危害的污染物,已成为国内外关注研究的热点。我国干旱半干旱地区约占国土面积的 1/2<sup>[1]</sup>,且主要分布在西北地区,这些地区的铅矿保有储量占西部地区的 44%,带来的铅污染现象也日趋严重<sup>[2]</sup>。铅不仅会造成土壤质量下降、影响农作物生长和品质,还能通过食物链富集而影响人类健康,造成人类的神经系统损伤,进入孕妇体内更会造成胎儿畸形<sup>[3-5]</sup>。利用植物修复重金属污染生态系统具有可操作性强、修复成本低、经济效益显著等优势<sup>[6-7]</sup>,已受到广泛关注。重金属污染土壤的植物修复技术按其修复的机理和过程可以分为 5 种类型<sup>[8]</sup>:植物提取、植物固定、植物挥发、植物促进和根际过滤。超富集植物在植物修复技术中起着举足轻重的作用,寻找较理想的重金属超积累植物是目前大多学者研究的热点<sup>[9-12]</sup>。

我国西北地区气候干燥、降水少、蒸发大,影响植物种子的萌发和幼苗生长。白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)是禾本科孔颖草属多年生草本植物<sup>[13]</sup>,丛生、根茎短,株高 60~90 cm,具有耐旱、耐盐碱、耐牧、耐践踏、固土保水、种子生产能力高等优点<sup>[14-15]</sup>。白羊草在生长期内具有很强的再生能力,是西北地区常见的优良牧草,具有独特的适应干旱环境的生理机制和形态结构<sup>[16]</sup>。目前对白羊草的研究主要集中在单一的胁迫对其造成的生长生理等方面的影响<sup>[16-21]</sup>,而研究在不同土壤水分条件下铅污染对白羊草种子萌发和幼苗的生长生理特性尚未见报道。为此,本研究通过培养试验探讨不同土壤水分条件下铅污染对白羊草种子萌发和幼苗生长生理的影响,旨在为重金属铅污染地区的植物修复以及西北旱区铅矿废弃地生态植被的恢复提供基础资料 and 理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试种子购自杨陵凌金稻种业公司,挑选籽粒饱满、大小一致、无虫害、纯度高的种子进行试验。试验试剂为分析纯醋酸铅( $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot$

$3\text{H}_2\text{O}$ )和聚乙二醇(PEG-6000)。

### 1.2 试验设计

**1.2.1 试验处理与培养液的配制** 试验设置土壤水分条件和铅胁迫 2 个因素。其中,土壤水分条件设置 4 个水平,用 PEG-6000 模拟干旱条件,配制 0%,5%,9.5%,15%的 PEG-6000 溶液,对应的试验所在地杨凌的壤土土壤相对含水量(土壤含水量占土壤田间持水量的比例,SRW)分别为 100%(CK),92.6%(T1),80%(T2)和 70%(T3),对应的土壤水势分别为 0, -0.05, -0.13 和 -0.3 MPa;铅胁迫设置 5 个水平,外源铅含量分别为 0(CK),100(A),300(B),500(C),700  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (D)。采用 2 因素随机区组设计,将醋酸铅加入 PEG 溶液中,配制含有醋酸铅的 PEG 培养液,共 20 个处理(表 1),每个处理重复 3 次。

**1.2.2 种子萌发试验** 种子用 2% NaClO 表面消毒 15 min,用去离子水冲洗干净后均匀摆入铺有 2 层无菌滤纸的直径为 120 mm 的培养皿(每个培养皿 50 粒种子)中,蒸馏水作对照,放置于室内光照培养箱中培养(25℃,光照强度 3000 Lx, 12 h · d<sup>-1</sup>)。根据实际情况,每天补充相同体积的培养液和蒸馏水,2~4 d 换 1 次滤纸,并及时清理发霉腐烂的种子,以防止感染其他种子,期间不施加任何肥料。

种子萌发试验从种子置床之日起观察,胚根露出种皮 1~2 mm 作为种子萌发标志。每个处理中最早有一粒种子萌发之日为该处理发芽的开始日期,每天记录萌发数,萌发末期连续 3 d 萌发粒数不足供试种子总数的 1%时,萌发结束<sup>[22]</sup>。

**1.2.3 幼苗生长试验** 参考朱慧等<sup>[23]</sup>的方法进行幼苗生长试验。种子萌发后,挑选长势均匀一致(胚根长度 1 cm)的幼苗,移栽至一次性塑料杯(杯口直径为 63 mm,杯底直径为 50 mm,高为 82 mm)与石英砂组成的培养床中,每杯加 10 mL 蒸馏水,加适量 Hoagland 完全培养液,光照培养(25℃,光照强度 3000 Lx, 24 h · d<sup>-1</sup>),育苗 5 d。然后与种子萌发试验对应,加入配制的含醋酸铅 PEG 溶液,光照培养 7 d,根据实际情况,每天补充相同体积的培养液和蒸馏水,每个杯子 30 株幼苗,每个处理重复 3 次。

表1 试验处理与处理代码表  
Table 1 Experimental treatment and code

铅含量 Lead content/mg · L <sup>-1</sup>	模拟的土壤相对含水量 The simulative soil water content/100%			
	100(CK)	92.6(T1)	80(T2)	70(T3)
0(CK)	CK	T1	T2	T3
100(A)	A	AT1	AT2	AT3
300(B)	B	BT1	BT2	BT3
500(C)	C	CT1	CT2	CT3
700(D)	D	DT1	DT2	DT3

### 1.3 测定指标与方法

发芽试验第4 d统计种子发芽势,第10 d统计发芽率,并从每个培养皿随机取10株苗(不足10株的全部测定),用直尺分别测量根长、苗长。

过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚显色法<sup>[24]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)比色法<sup>[18]</sup>;CAT活性测定采用H紫外分光光度法<sup>[24]</sup>;丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法<sup>[24]</sup>。其中,FW为样品鲜重。

### 1.4 数据处理

试验数据经过整理后用Excel 2003软件对所测的3个重复数据取平均值,并作图,运用SAS 8.1软件进行差异显著性分析,运用SPSS 18.0软件进行双因素交互作用分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤水分条件下铅胁迫对种子发芽和幼苗生长的影响

由表2可知,不同土壤水分条件和铅胁迫对种子的发芽率和发芽势具有一定的影响。在单一的土壤水分条件处理时,随着土壤相对含水量的降低,发芽率和发芽势整体出现下降趋势,但与对照(除T3处理外)的差异不显著( $P>0.05$ ),表明白羊草种子发芽对土壤相对含水量大于80%的土壤水分条件较不敏感,对土壤相对含水量为70%的土壤水分条件反应较敏感。在单一的铅胁迫时,随着铅胁迫的增加,发芽率和发芽势整体呈下降趋势,与对照(除A处理外)的差异显著( $P<0.05$ ),B、C、D组的发芽率较对照分别下降了15.06%,59.59%,83.56%,发芽势较对照分别下降了54.28%,81.43%,92.15%,表明白羊草种子发芽对低浓度的铅

( $<100\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )胁迫反应不敏感,而对铅含量大于 $300\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的胁迫反应敏感。随着干旱和铅交互胁迫程度的增加,发芽率和发芽势均表现为先升后降。在铅含量为 $100(\text{A})\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下,土壤相对含水量为92.6%(T1)时的发芽势和发芽率取得最大值,但与对照差异不显著( $P>0.05$ );在铅含量为 $300(\text{B}),500(\text{C}),700(\text{D})\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下,土壤相对含水量为80%(T2)时的发芽势和发芽率取得最大值,且与对照(BT2处理的发芽率除外)差异显著( $P<0.05$ )。这表明,在铅含量小于 $700\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,适度的交互干旱胁迫能够提高白羊草种子的发芽率和发芽势,促进种子萌发。

不同土壤水分条件和铅胁迫不仅对种子萌发有一定的影响,而且对萌发后幼苗的生长也存在很大影响。表2显示,单一的土壤水分条件下不同处理对幼苗的根长和苗长均有一定的抑制作用,随着土壤相对含水量的降低,根长和苗长均出现下降趋势,且与对照(T1处理的苗长除外)差异显著( $P<0.05$ ),表明白羊草幼苗对土壤不同水分条件反应较敏感。在单一的铅胁迫时,随着铅胁迫的增加,幼苗的根长和苗长也呈下降趋势,与对照差异显著( $P<0.05$ ),铅处理各组的根长较对照分别下降了76.44%,96.53%,99.46%,99.78%,苗长较对照分别下降了10.84%,34.82%,61.08%,75.54%,并且根长下降的程度大于苗长,表明白羊草幼苗生长对铅胁迫反应敏感,且根比苗更为敏感。随着水分和铅交互胁迫程度的增加,幼苗根长表现为先升后降的趋势,但均显著低于对照( $P<0.05$ ),且在土壤相对含水量为80%(T2)时出现最大值;当铅含量为 $700\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,交互胁迫完全抑制了根的生长,抑制率为100%。对于交互胁迫的反应,苗长则表现为逐渐减低的趋势,与对照(AT1处理除外)差异显著( $P<0.05$ )。这表明,交互胁迫对白羊草幼苗根长的影响要大于对其苗长的影响。

表 2 交互胁迫对白羊草种子发芽和幼苗生长的影响

Table 2 Effects of interactive stress on seed germination and seedling growth of *Bothriochloa ischaemum*

处理 Treatments	发芽率 Germination rates/%	发芽势 Germination potentials/%	根长 Root length/cm	苗长 Germ length/cm
CK	97.33±3.06 <sup>a</sup>	93.33±4.62 <sup>a</sup>	9.21±1.03 <sup>a</sup>	8.30±0.13 <sup>a</sup>
T1	96.67±1.15 <sup>a</sup>	88.00±4.00 <sup>a</sup>	8.20±0.73 <sup>b</sup>	8.11±0.22 <sup>a</sup>
T2	88.00±5.29 <sup>abc</sup>	74.00±2.00 <sup>b</sup>	5.90±0.75 <sup>c</sup>	5.72±0.32 <sup>d</sup>
T3	76.00±15.62 <sup>d</sup>	55.33±25.17 <sup>cd</sup>	4.46±0.46 <sup>d</sup>	4.18±1.19 <sup>f</sup>
A	94.67±2.31 <sup>a</sup>	90.67±5.03 <sup>a</sup>	2.17±0.33 <sup>f</sup>	7.40±0.46 <sup>bc</sup>
AT1	98.67±1.15 <sup>a</sup>	94.00±4.00 <sup>a</sup>	3.88±1.12 <sup>de</sup>	7.46±0.11 <sup>abc</sup>
AT2	97.33±3.06 <sup>a</sup>	88.67±3.06 <sup>a</sup>	3.91±0.45 <sup>de</sup>	6.77±0.43 <sup>c</sup>
AT3	91.33±3.06 <sup>abc</sup>	67.33±1.15 <sup>bc</sup>	3.59±0.40 <sup>e</sup>	4.40±0.38 <sup>f</sup>
B	82.67±4.16 <sup>cd</sup>	42.67±10.07 <sup>de</sup>	0.32±0.22 <sup>gh</sup>	5.41±0.34 <sup>de</sup>
BT1	91.33±4.16 <sup>abc</sup>	73.33±4.16 <sup>b</sup>	1.01±0.20 <sup>g</sup>	5.44±0.49 <sup>de</sup>
BT2	92.00±2.00 <sup>abc</sup>	54.00±11.14 <sup>d</sup>	1.03±0.31 <sup>g</sup>	4.76±0.59 <sup>ef</sup>
BT3	84.67±1.15 <sup>bcd</sup>	50.00±5.29 <sup>d</sup>	2.05±0.36 <sup>f</sup>	3.91±0.29 <sup>fg</sup>
C	39.33±11.55 <sup>g</sup>	17.33±6.43 <sup>gh</sup>	0.05±0.01 <sup>h</sup>	3.23±0.78 <sup>gh</sup>
CT1	60.67±11.02 <sup>f</sup>	28.67±7.57 <sup>fg</sup>	0.14±0.09 <sup>h</sup>	4.09±0.36 <sup>fg</sup>
CT2	72.00±4.00 <sup>e</sup>	35.33±5.03 <sup>ef</sup>	0.40±0.01 <sup>h</sup>	3.91±0.18 <sup>fg</sup>
CT3	66.00±7.21 <sup>ef</sup>	30.67±5.03 <sup>ef</sup>	0.29±0.13 <sup>gh</sup>	2.74±0.32 <sup>hi</sup>
D	16.00±4.00 <sup>i</sup>	7.33±1.15 <sup>h</sup>	0.02±0.03 <sup>h</sup>	2.03±0.11 <sup>i</sup>
DT1	24.00±2.00 <sup>hi</sup>	11.33±1.15 <sup>h</sup>	0.00±0.00 <sup>h</sup>	3.22±0.62 <sup>gh</sup>
DT2	38.67±2.31 <sup>g</sup>	15.33±5.03 <sup>h</sup>	0.00±0.00 <sup>h</sup>	2.88±0.60 <sup>h</sup>
DT3	33.33±4.16 <sup>gh</sup>	10.00±2.00 <sup>h</sup>	0.00±0.00 <sup>h</sup>	1.94±0.34 <sup>i</sup>

注:同列不同字母间表示差异显著( $P < 0.05$ ),“±”后的数字代表标准差

Note: Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level, the number after the “±” represents the standard deviation

## 2.2 不同土壤水分条件下铅胁迫对幼苗叶片 POD 的影响

研究结果显示(图 1),在单一的土壤水分条件不同处理时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片的 POD 活性呈现先升高后下降的趋势,且显著高于对照( $P < 0.05$ ),在土壤相对含水量为 92.6%(T1)时取得最大值,为对照的 171.54%,表明 POD 对土壤不同水分条件反应较敏感。在单一的铅胁迫时,随着铅胁迫程度的加剧,白羊草幼苗叶片的 POD 活性整体呈现升高趋势,除 A 处理低于对照外,其余均显著高于对照( $P < 0.05$ ),当铅含量为 700 mg · L<sup>-1</sup>(D)时,达到单一铅胁迫的最大值,为对照的 223.01%。表明白羊草幼苗对低浓度的铅(<100 mg · L<sup>-1</sup>)胁迫反应不敏感,对大于 100 mg · L<sup>-1</sup>的铅胁迫反应较敏感。在铅含

量为 100(A) mg · L<sup>-1</sup>和 300(B) mg · L<sup>-1</sup>处理下,随着土壤相对含水量的降低,POD 活性表现为先升高后降低的趋势,并在中度干旱(T2)处理下达到最大值,分别为对照的 113.35%和 160.68%,但组内处理差异不显著( $P > 0.05$ )。在铅含量为 500 mg · L<sup>-1</sup>的处理下,随干旱程度的加剧,POD 活性表现为先降低后升高的趋势,在土壤相对含水量为 70%(T3)处理下达到交互胁迫的最大值,为对照的 185.57%。在铅含量为 700 mg · L<sup>-1</sup>的处理下,随土壤相对含水量的降低,POD 活性表现为依次降低的趋势。交互胁迫的 POD 活性均高于对照,且除 A 处理外,其余均与对照差异显著( $P < 0.05$ )。交互胁迫下的白羊草幼苗叶片 POD 活性均高于单一的铅胁迫处理,表明这时的交互胁迫对 POD 的活性有激发作用。

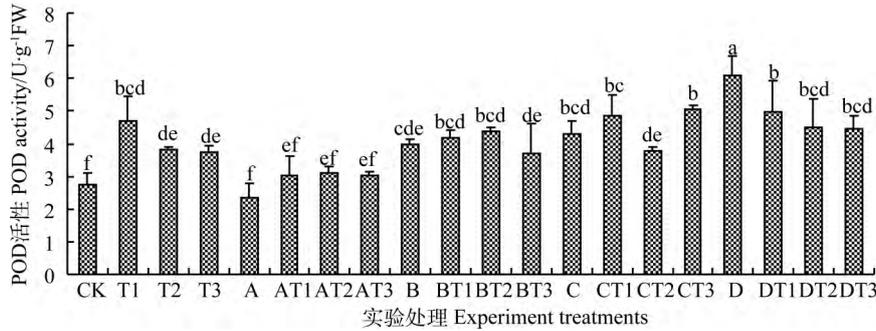


图 1 交互胁迫对白羊草幼苗叶片 POD 活性的影响

Fig.1 Effects of interactive stress on POD activity in the leaves of *Bothriochloa ischaemum*

2.3 不同土壤水分条件下铅胁迫对幼苗叶片 SOD 的影响

研究结果表明(图 2),在单一的土壤水分条件不同处理时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片的 SOD 活性表现为先降低后升高的趋势,各处理均低于对照,但与对照(T2 除外)差异不显著( $P > 0.05$ ),且在土壤相对含水量为 80%(T2)时取得最小值。在单一的铅胁迫时,白羊草幼苗叶片的 SOD 逐渐升高,在铅含量为 700 mg · L<sup>-1</sup> 时取得最大值,为对照的 148.69%,且与对照差异显著( $P < 0.05$ ),说明白羊草幼苗有较强的耐铅胁迫能力。水分和铅交互胁迫对白羊草幼苗叶片的 SOD 活性影响较为复杂,在铅含量为 100 mg · L<sup>-1</sup> (A)和 300(B)mg · L<sup>-1</sup> 的处理下,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗

叶片的 SOD 活性呈现为先下降后升高的趋势,并在土壤相对含水量为 92.6%(T1)时达到最大值,分别为对照的 129.78%和 133.91%,但与对照差异不显著( $P > 0.05$ )。在铅含量为 500(C) mg · L<sup>-1</sup> 和 700 (D) mg · L<sup>-1</sup> 的处理下,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片的 SOD 活性逐渐降低,但与对照差异不显著( $P > 0.05$ ),说明随着交互胁迫程度的加剧,造成了白羊草幼苗一定程度的损害。交互胁迫下的白羊草幼苗叶片 SOD 活性均低于对照和土壤相对含水量为 70%(T3)的单一水分处理,但高于土壤相对含水量为 92.6%(T1)的单一水分处理。表明土壤相对含水量为 92.6%时,交互胁迫对白羊草幼苗叶片 SOD 活性有激发作用,而土壤相对含水量为 70%的处理则对其有拮抗作用。

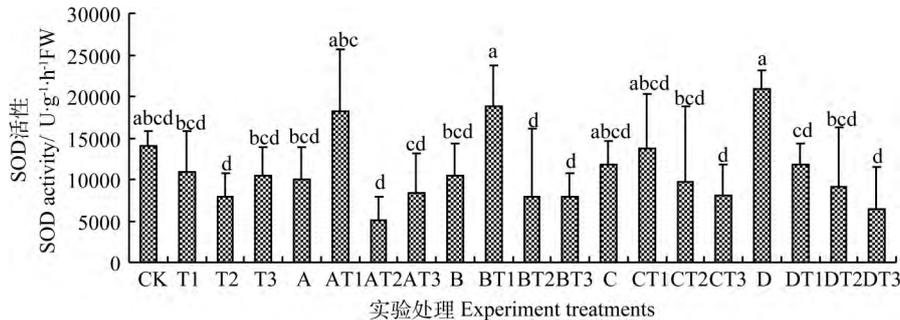


图 2 交互胁迫对白羊草幼苗叶片 SOD 活性的影响

Fig.2 Effects of interactive stress on SOD activity in the leaves of *Bothriochloa ischaemum*

2.4 不同土壤水分条件下铅胁迫对幼苗叶片 CAT 的影响

研究结果显示(图 3),在单一的土壤水分条件不同处理时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片的 CAT 活性呈现逐渐下降的趋势,并在土壤相对含水量为 92.6%(T1)时取得最大值,且显著高于对照( $P < 0.05$ ),为对照的 123.23%;在土壤相对含水量为 70%(T3)时,白羊草幼苗叶片的 CAT 活性显著低于对照( $P < 0.05$ ),为对照的

66.01%;表明高土壤相对含水量(92.6%)可以激发 CAT 的活性,而低土壤相对含水量(70%)会抑制 CAT 活性。在单一的铅胁迫时,随着铅胁迫程度的加剧,白羊草幼苗叶片的 CAT 活性表现为先升高再降低的趋势,与对照差异显著( $P < 0.05$ ),并在铅含量为 500 mg · L<sup>-1</sup> (C) 的处理下达到最大值,为对照的 120.44%,表明白羊草幼苗叶片 CAT 活性对铅胁迫的反应较敏感,高浓度和低浓度的铅胁迫均会抑制 CAT 活性,适度的铅胁迫

(500 mg · L<sup>-1</sup>)对其活性有激发作用。当铅含量为 100 mg · L<sup>-1</sup>(A)时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片 CAT 活性表现为逐渐升高的趋势,但组内处理差异不显著( $P>0.05$ );当铅含量为 300 mg · L<sup>-1</sup>(B)处理时,随土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片 CAT 活性表现为先升高后降低的趋势,并在土壤相对含水量为 80%

(T2)的处理下达到最大值,为对照的 60.17%;在铅含量为 500 mg · L<sup>-1</sup>和 700 mg · L<sup>-1</sup>处理下,随土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片 CAT 活性表现为依次降低的趋势。交互胁迫下的白羊草幼苗叶片 CAT 活性均显著低于对照和单一的胁迫( $P<0.05$ ),表明这时的交互胁迫对 CAT 的活性有一定的抑制作用。

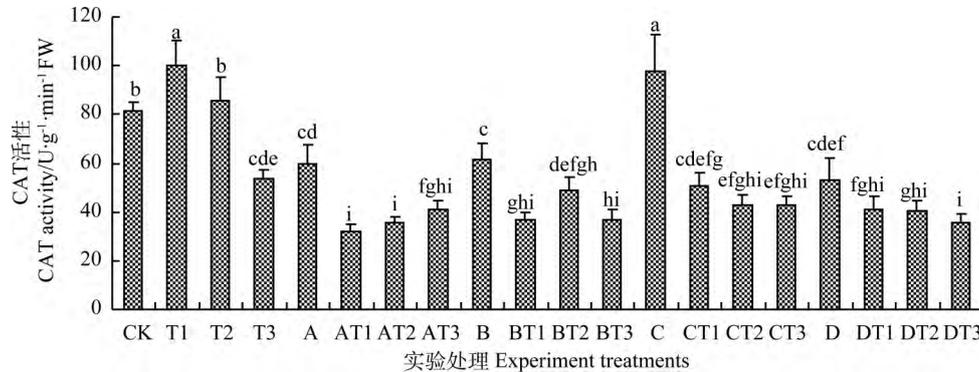


图3 交互胁迫对白羊草幼苗叶片 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effects of interactive stress on CAT activity in the leaves of *Bothriochloa ischaemum*

## 2.5 不同土壤水分条件下铅胁迫对幼苗叶片 MDA 含量的影响

图4表明,在单一的土壤水分条件不同处理时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片的 MDA 含量呈现逐渐降低的趋势,整体显著高于对照( $P<0.05$ ),并在土壤相对含水量为 92.6%(T1)时取得最大值,为对照的 222.46%。在单一的铅胁迫时,随着铅胁迫程度的加剧,白羊草幼苗叶片的 MDA 含量则是逐渐升高,整体显著高于对照( $P<0.05$ ),并在铅含量为 700 mg · L<sup>-1</sup>(D)的处理下达到最大值,为对照的 231.09%。表明单一的铅胁迫会使白羊草幼苗体内的活性氧水平上升,细胞受损。在土壤相对含水量为 80%(T2)下,铅含量小于 700 mg · L<sup>-1</sup>处理的

(A、B、C)白羊草幼苗叶片 MDA 含量均高于其他的水分(T1、T3)处理。在 CT2 处理下的白羊草幼苗叶片 MDA 含量达到交互胁迫的最大值,显著高于对照( $P<0.05$ ),为对照的 236.03%,为 C 处理的 106.02%;交互胁迫处理时的白羊草幼苗叶片 MDA 含量最小值出现在 AT1 的处理上,为对照的 209.41%。当铅含量达到 700 mg · L<sup>-1</sup>时,随着土壤相对含水量的降低,白羊草幼苗叶片 MDA 含量逐渐升高,并在土壤相对含水量为 70%(T3)时取得最大值。此外,AT1、BT1 处理下的白羊草幼苗叶片 MDA 含量均低于 T1 处理,说明在土壤相对含水量为 92.6%时,白羊草幼苗对适度的交互胁迫(铅含量 < 300 mg · L<sup>-1</sup>)具有一定的自我保护能力。

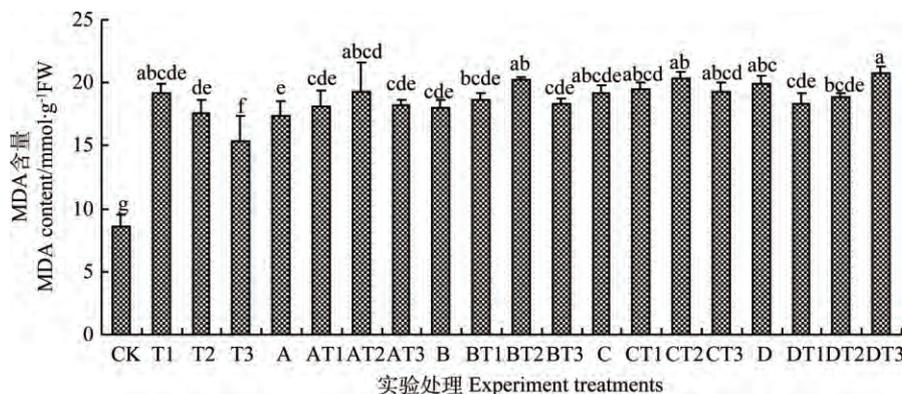


图4 交互胁迫对幼苗叶片 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of interactive stress on MDA content in the leaves of *Bothriochloa ischaemum*

### 3 讨论

#### 3.1 不同土壤水分条件下铅胁迫对白羊草生长指标的影响

种子萌发和幼苗生长是植物生命周期的重要阶段,也是对外界环境最敏感的时期之一<sup>[25]</sup>。植物遭受环境胁迫后会普遍矮化,其中根系和株高是衡量植物幼苗在胁迫下受到伤害的重要指标。因此,种子萌发和苗期生长情况常用来衡量植物的抗逆性<sup>[26-27]</sup>。本研究中,单一处理时,随着土壤水分含量的降低和铅含量的增大,白羊草种子的发芽率、发芽势、根长和苗长均下降,表现为对种子萌发和幼苗生长有一定的抑制作用,但种子萌发和幼苗生长对铅胁迫的反应比水分处理的反应更敏感,当铅含量为  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,白羊草幼苗的根长抑制率已达到 99.46%。朱慧等<sup>[23]</sup>研究发现在干旱胁迫的条件下,五爪金龙(*Ipomoea cairica*)种子的初始萌发时间延迟,萌发率、萌发势、苗高显著降低;伏兵哲等<sup>[28]</sup>采用不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫的方法对 16 个苜蓿品种种子萌发期的抗旱性进行比较,发现随着胁迫强度的增强,种子的发芽率和发芽势均明显下降。不同浓度的醋酸铅处理对含羞草幼苗苗长、根长及全株鲜重有不同程度的抑制作用,其中根长下降趋势明显,而苗长的下降趋势较平缓<sup>[29]</sup>。本试验结果与此结论一致。有研究表明,重金属对植物种子萌发的影响有低浓度促进和高浓度抑制作用。本研究结果与陈伟等<sup>[30]</sup>报道的  $\text{Pb}^{2+}$  不同浓度处理下,导致草地早熟禾(*Poa pratensis*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinaceae*)和白三叶(*Trifolium repens*)4 种草坪草的发芽率显著降低的结论一致。

交互胁迫对白羊草种子萌发的影响不同于单一的土壤水分条件不同处理和铅胁迫,说明较高的土壤相对含水量和轻度的铅交互胁迫可以促进白羊草种子的萌发,并且白羊草种子为了适应外界轻度的胁迫会做出积极的调整,但当外界的胁迫超过白羊草的耐受限度时,种子萌发和幼苗生长就会受到抑制,并对其造成不良影响。对比各个胁迫对种子和幼苗各指标的影响发现,其抑制效应顺序为根长 > 苗长 > 发芽率,这是由于种子萌发时胚根最先突破种皮,接触到来自外部环境的胁迫,使得根在受胁迫的积累量和时间上均大于苗,从而受到更深的危害<sup>[31]</sup>。这与杨楠<sup>[32]</sup>研究的交互胁迫对紫穗槐(*Amaorpha fruticosa*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种子的萌发和幼苗生长的影响结果一致。

#### 3.2 不同土壤水分条件下铅胁迫对白羊草生理指标的影响

过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和

过氧化氢酶(CAT)是植物适应多种逆境胁迫的重要酶类,可以清除植物体内的活性氧,抑制 MDA 的积累,提高植物的抗逆能力。本研究中,当土壤相对含水量低于 80% 时,白羊草幼苗叶片中 POD 和 CAT 活性均开始下降,但是 SOD 活性仍上升,说明 POD 和 CAT 活性可能存在一个阈值,而 SOD 开始转变为促进活性氧的累积,反映出白羊草幼苗抗氧化能力开始衰退,继续持续水分胁迫可能会对其造成一定的伤害。单一的铅胁迫对白羊草幼苗叶片 POD 和 SOD 的影响是一致的,表现为逐渐升高的趋势,而 CAT 则表现为先升后降,这与孙小霞<sup>[33]</sup>发现的高羊茅在铅胁迫下 CAT 活性呈先升高后降低的变化规律一致。说明白羊草对单一的土壤水分条件不同处理和单一的铅胁迫很敏感,能够迅速调动 SOD 和 POD 的活性,这是白羊草对干旱的适应性的一种反应。但这与张青等<sup>[34]</sup>的研究结果不一致,其发现单一的铅处理下的国槐(*Sophora japonica*)幼苗 POD 和 SOD 的变化呈现先升高后降低,这可能是由于草本植物与木本植物对铅的敏感程度不一致的原因。

水分和铅交互胁迫对白羊草 SOD、POD 和 CAT 的影响规律不明显。POD 活性受到交互胁迫的诱导相比单一胁迫条件下有所增加,表明水分与铅胁迫间的交互作用对 POD 活性的诱导表现为协同作用。SOD 活性受到较高土壤相对含水量处理(T1)时的交互胁迫的诱导相比单一胁迫条件下有所增加,表明此时的水分与铅的交互作用对 SOD 活性的诱导表现为协同作用,而 SOD 活性受较低土壤相对含水量处理(T3)时的交互胁迫的诱导相比单一胁迫条件下有所降低,表明此时的水分与铅胁迫间的交互作用对 SOD 活性的诱导表现为拮抗作用。这与张青等<sup>[34]</sup>报道的水分和铅交互胁迫对国槐幼苗 POD 和 SOD 活性的影响规律不一致,可能是由于水分和铅胁迫程度不同的原因。CAT 活性受到交互胁迫的诱导相比单一胁迫条件下有所降低,表明水分与铅胁迫间的交互作用对 CAT 活性的诱导表现为拮抗作用。

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物,其含量高低可以在一定程度上反映植物遭受逆境伤害的程度<sup>[35]</sup>。本研究发现,在单一的土壤相对含水量不同处理时,白羊草幼苗叶片 MDA 含量呈现逐渐降低的趋势,并且均显著高于对照( $P < 0.05$ ),表明此时的白羊草能够及时清除体内产生的自由基,以抵抗其细胞受到的伤害,说明白羊草具有一定的抗旱性。单一的铅胁迫则导致白羊草幼苗叶片 MDA 含量逐渐增加,与张青等<sup>[34]</sup>研究的单一的铅处理下的国槐幼苗 MDA 含量随铅含量的升高而增加,谢传俊等<sup>[36]</sup>研究

的假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)和结缕草(*Zoysia japonica*)在铅胁迫下 MDA 含量升高的规律一致。水分和铅交互胁迫处理下,白羊草幼苗叶片 MDA 含量均明显增加,与对照差异显著( $P < 0.05$ ),表明交互胁迫对白羊草生物膜系统造成了一定的伤害,这与张青等<sup>[34]</sup>报道的水分和铅交互胁迫会对国槐幼苗的生物膜系统造成伤害的结果一致。

#### 4 结 论

通过对白羊草种子萌发的发芽率、发芽势和幼苗的根长、苗长以及幼苗叶片 POD、SOD、CAT 活性和 MDA 含量的变化研究,均表明白羊草对水分和铅交互胁迫具有一定的耐受性(土壤相对含水量 70%,铅含量  $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下仍能存活并生长),而且适当的交互胁迫(土壤相对含水量 92.6%,铅含量  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )能够提高白羊草的种子发芽率(为对照的 101%),激发白羊草幼苗叶片 POD、SOD 的活性和 MDA 的含量(分别为对照的 110%,130%和 209%),有利于提高白羊草的抗逆性。鉴于白羊草是西北地区常见的一种耐铅植物,因此,考虑用其作为西北地区铅锌矿区生态系统修复的先锋草本植物具有一定的可行性。本研究仅对其种子萌发和幼苗的生长生理特性,用人工模拟干旱和铅胁迫的试验方法进行了探讨,其他发育阶段的生长、生理变化和机理还有待于进一步探究。

#### 参 考 文 献

[1] 倪坤,唐久来. 铅对发育中的神经系统的影响[J]. 安徽医学, 2011,32(5):695-697

[2] 高永强,马燕. 铅对人体的危害[J]. 内蒙古环境科学,2007,19(3):115-117

[3] 王英辉,伍乃东. 铅污染土壤的植物修复技术研究[J]. 中国土壤与肥料,2007,(5):6-10

[4] 樊荣等. 树木对水分胁迫影响机理研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报,2009,30(3):281-286

[5] 周芙蓉,王进鑫,杨楠,等. 水分和铅胁迫对土壤酶活性的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):479-484

[6] Terry McIntyre. Phytoremediation of Heavy Metals from Soils [J]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 2003,78:97-123

[7] 张继舟,王宏韬,袁磊,等. 重金属污染土壤的植物修复技术研究[J]. 中国农学通报,2013,29(14):134-139

[8] Cunningham S D. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants[J]. Adv Agron,1996(56):55-114

[9] 周东美,郝秀珍,薛艳. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. 生态环境,2004,13(2):234-242

[10] 王广林,王立龙,李征. 杂草对土壤重金属的富集与含量特征研究[J]. 生态学杂志,2005,24(6):639-643

[11] 雷梅,岳庆玲,陈同斌. 湖南楠竹园土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报,2005,25(5):1146-1151

[12] 罗辉,朱易春,冯秀娟. 重金属污染土壤的生物修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(5):224-227

[13] 王栋. 牧草学各论[M]. 江苏:江苏科学技术出版社,1989:147-148

[14] 董宽虎,米佳. 白羊草种群繁殖的数量特征[J]. 草地学报,2006,14(3):210-213

[15] Schmidt C, Hickman K, Channell R, et al. Competitive abilities of native grasses and non-native(*Bothriochloa* spp.) grasses[J]. Plant Ecology,2008,197(1):69-80

[16] 程林梅,李占林,高洪文,等. 水分胁迫对白羊草光合生理特性的影响[J]. 中国农学通报,2004,20(6):231-233

[17] 武路广,方志红,董宽虎. NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  胁迫对白羊草种子萌发的影响[J]. 山西农业科学,2011,10:1115-1118

[18] 刘娟,董宽虎. 干旱胁迫及复水对白羊草质膜 ATP 酶和 5'-核苷酸酶活性的影响[J]. 草地学报,2011,19(6):1025-1029, 1050

[19] 张昌胜,刘国彬,薛蓬,等. 干旱胁迫和  $\text{CO}_2$  浓度升高条件下白羊草的光合特征[J]. 应用生态学报,2012,23(11):3009-3015

[20] 徐伟洲,徐炳成,段东平,等. 不同水肥条件下白羊草光合生理生态特征研究 III. 叶绿素荧光参数[J]. 草地学报,2011,19(1):31-37

[21] 丁文利,舒佳礼,徐伟洲,等. 水分胁迫和组合比例对白羊草与达乌里胡枝子叶绿素荧光参数的影响[J]. 草地学报,2014,22(1):94-100

[22] 孙时轩. 造林学[M]. 北京:中国林业出版社,1992:48

[23] 朱慧,马瑞君,吴双桃,等. 干旱胁迫对五爪金龙种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(2):344-349

[24] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安:世界图书出版社,2000:137-202

[25] 马文丽,金小弟,王转花. 镉处理对燕麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1):55-59

[26] Abedin M J, Meharg A A. Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant and soil,2002,243:57-66

[27] Peralta J R, Gardea-Torresdey J L, Tiemann K J, et al. Uptake and effects of five heavy metal on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Environmental Contamination and Toxicology,2001,66:727-734

[28] 伏兵哲,兰剑,李小伟,等. PEG-6000 干旱胁迫对 16 个苜蓿品种种子萌发的影响[J]. 种子,2012,31(4):10-14

[29] 唐为萍,陈树思,陈琳. 铅处理对含羞草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学,2009,48(11):2777-2779

[30] 陈伟,张苗苗,宋阳阳,等. 重金属胁迫对 4 种草坪草种子萌发的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):556-563

[31] 马文丽,金小弟,王转花. 铅胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版),2004,7(2):202-204

[32] 杨楠. 干旱及铅胁迫对主要造林树种种子萌发与幼苗生长的影响[D]. 陕西:西北农林科技大学,2012

[33] 孙小霞. 高羊茅对铅递进胁迫的生理响应[J]. 河南科技大学学报,2006,27(6):75-78

[34] 张青,王进鑫,邹朋,等. 水分和铅交互胁迫对国槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):476-483

[35] 李荣春. Cd、Pb 及其复合污染对烟叶生理生化指标的影响[J]. 云南农业大学学报,1997,12(1):45-49

[36] 谢传俊,杨集辉,周守标,等. 铅递进胁迫对假俭草和结缕草生理特性的影响[J]. 草业学报,2008,17(4):65-70

(责任编辑 陈力玉)