

水分和铅双重胁迫对紫穗槐苗木 叶片抗氧化酶活性的影响

伍欢, 王进鑫, 张青, 刘俊峰, 邹朋

(西北农林科技大学 资源环境学院, 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探讨在水分和铅双重胁迫条件下, 紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.) 苗木叶片抗氧化酶活性的变化, 采用旱棚盆栽试验, 研究了不同水分胁迫处理(土壤相对含水量分别为田间持水量的 100%, 80%, 60% 和 40%) 和铅胁迫处理(土壤中铅含量分别为 0, 1 000, 2 000, 4 000 和 6 000 mg/kg) 及其双重作用对紫穗槐苗木叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响。结果表明, 在单一的铅胁迫处理下, 随着胁迫的加剧, 紫穗槐苗木叶片的 SOD 和 CAT 活性呈先升高后降低的趋势, POD 活性一直呈升高趋势; 在单一的水分胁迫处理下, 随着胁迫的加剧, SOD 和 POD 活性呈先升高后降低的趋势, CAT 活性呈先降低后升高的趋势; 水分和铅双重胁迫对 SOD 和 POD 活性有显著的激活作用, 对低铅含量($\leq 2\ 000$ mg/kg)处理的 CAT 活性有激活作用; 适度的双重胁迫(铅含量 $\leq 2\ 000$ mg/kg, 土壤相对含水量 $\geq 40\%$)有利于提高紫穗槐苗木对水分和铅双重胁迫的耐受性。

关键词: 紫穗槐; 水分; 铅; 双重胁迫; 抗氧化酶系统

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0065-05

中图分类号: S551⁺3, Q945.78

Effects of Combined Drought and Lead Stress on Antioxidant Enzyme Activities of *Amorpha Fruticosa* L. Seedlings

WU Huan, WANG Jin-xin, ZHANG Qing, LIU Jun-feng, ZOU Peng

(College of Resources and Environment, and Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China of the Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective of this experiment is to study changes of antioxidant enzyme activity in *Amorpha fruticosa* L. Seedlings grown under combined drought and lead(Pb) stress. Pot experiment was carried out in a rain-proof shed to investigate the effects of drought stress(soil relative water contents were 100%, 80%, 60% and 40%), Pb stress(Pb contents were 0, 1 000, 2 000, 4 000 and 6 000 mg/kg), and the combined stress on the superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and catalase(CAT) activities in the leaves of *A. fruticosa* L. seedlings. Results showed that SOD and CAT activities in the leaves of *A. fruticosa* L. seedlings first increased and then declined, but POD activity increased with the increase of the Pb content in soil under Pb stress. With the decrease of soil relative water content under drought stress, SOD and POD activities first increased and then declined, and CAT activity first declined and then increased. SOD and POD activities significantly increased under the combined drought and Pb stress, and CAT activity increased under the combined stress when the Pb content in soil was equal to or less than 2 000 mg/kg. In conclusion, *A. fruticosa* L. seedlings have a strong tolerance to the combined effects of drought (soil relative water content $\geq 40\%$) and Pb (Pb content $\leq 2\ 000$ mg/kg) stress.

Keywords: *Amorpha fruticosa* L.; water; lead; combined stress; antioxidant enzyme

随着经济社会的发展和气候的变化,水资源短缺已成为全球性的生态问题。中国的干旱、半干旱、亚

湿润干旱地区的总面积为 3.32×10^4 km², 占国土总面积的 34.6%^[1], 主要分布在西北地区, 西北干旱地

收稿日期: 2013-06-05

修回日期: 2013-06-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“耐旱树种对铅和节律性干旱双重胁迫的共存耐性与交叉适应机制”(31170579)

作者简介: 伍欢(1991—), 女(汉族), 四川省西昌市人, 在读硕士研究生, 研究方向为生态环境工程。E-mail: babara712@163.com。

通信作者: 王进鑫(1962—), 男(汉族), 甘肃省镇原县人, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区人工林生态系统水分运移调控与生态恢复理论研究。E-mail: jwang118@126.com。

区的铅锌矿石的储量很大^[2],矿产的开采及加工对环境造成了极大破坏。铅是一种不可降解的污染物,它不仅会影响植物和农作物的生长,而且可以通过食物链进入人体,对人的健康造成威胁。近年来,利用植物修复重金属污染土壤的研究逐渐增多,大多数学者^[3-5]对铅富集植物和铅对植物生理生化特性影响的研究主要集中在生长周期较短的农作物和一年生草本植物上,有关铅对木本植物生理生化特性影响的研究较少。木本植物较草本植物而言,具有生物量大、生长周期长和便于管理等优势,在重金属污染土壤的修复方面具有很大潜力。目前相关的研究中缺乏针对西北铅锌矿区普遍存在的干旱和重金属铅双重胁迫问题的研究。

为此,本研究选取中国西北干旱地区广泛种植的耐旱性较强的木本植物紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.),研究紫穗槐苗木对干旱和铅双重胁迫的生理生化响应机制,阐明紫穗槐苗木对逆境的抗性和适应能力,这对木本植物资源开发以及干旱区矿业废弃地植被恢复和重建具有重要的理论与实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试苗木为一年生的紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.),采自陕西省杨凌区附近的苗圃。起苗前对圃地苗木进行调查,选用地径、株高和长势基本一致的苗木。供试苗木平均苗高 74.9 ± 6.3 cm,平均地径 11.2 ± 1.8 mm,苗龄为 1 a。栽培基质为壤土,质地为重壤,田间持水量 22.3%,土壤 pH 值 8.24,土壤有机质含量 13.70 g/kg,全氮含量 0.73 g/kg,速效磷含量 35.91 mg/kg,速效钾含量 96.52 mg/kg,土壤铅背景值 16.3 ± 2.96 mg/kg^[6]。2011 年 12 月,向土样中加入 99%的分析 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,充分混匀后钝化 2 个月,以作备用。

1.2 试验方法

试验地布设于陕西省杨凌区西北农林科技大学主校区人工旱棚内。试验采用完全随机区组设计,共设 4 个水分处理水平和 5 个铅处理水平,共 20 个处理(表 1),每处理重复 3 次。4 个水分处理水平分别为:土壤相对含水量(SWRC)100%(CK),80%(轻微水分胁迫),60%(轻度水分胁迫)和 40%(重度水分胁迫)^[7-9]。5 个铅处理水平分别为:0,1 000,2 000,4 000 和 6 000 mg/kg。2012 年 3 月,将钝化后的土样盛入高 30 cm,口径 27 cm 的塑料容器中,按 0—30 cm 平均土壤容重 1.15 g/cm^3 装土,保证各容器中干土重一致。并将苗木移栽至容器,每容器 1 株紫穗

槐,移栽前清洗苗木根部附着土壤。在紫穗槐苗木生长期间,采用称重法控制土壤相对含水量,每 3 d 称量 1 次,以便及时调整每日补充灌水量,同时,所有容器土表面覆盖厚约 2 cm 的砂石以减少水分蒸发。试验期间不施肥,使栽培基质保持自然肥力。

表 1 试验处理及处理代码

Pb 含量/ (mg · kg ⁻¹)	土壤相对含水量			
	100%(CK)	80%(T ₁)	60%(T ₂)	40%(T ₃)
0(CK)	CK	T ₁	T ₂	T ₃
1 000(A)	A	AT ₁	AT ₂	AT ₃
2 000(B)	B	BT ₁	BT ₂	BT ₃
4 000(C)	C	CT ₁	CT ₂	CT ₃
6 000(D)	D	DT ₁	DT ₂	DT ₃

注:CK 代表土壤相对含水量 100%、外源铅含量 0 mg/kg 的处理;A,B,C,D 分别代表土壤外源铅含量 1 000,2 000,3 000,4 000 和 6 000 mg/kg 的处理;T₁,T₂,T₃ 分别代表土壤相对含水量 80%,60% 和 40% 的处理。

1.3 测定项目及方法

酶液的制备:于 2012 年 5 月 18 日上午采集紫穗槐叶片,每株均取新梢中部的成熟叶片,将采集后的叶片编号并置于 4 °C 冷藏保存。每处理取 0.5 g 鲜叶片于预冷的研钵中,加入 0.05 mol/L 的冷磷酸缓冲液(pH 值 7.8)5 ml 和少量石英砂,冰浴研磨。至匀浆后用 0.05 mol/L 的冷磷酸缓冲液(pH 值 7.8)5 ml 冲洗,并转移至离心管。10 000 rpm 4 °C 离心 15 min,上清液即为酶提取液,将酶液转移至试管,4 °C 冷藏保存,作为备用。

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)法^[10]测定,取酶液 0.2 ml 于试管中,加入核黄素、Met 溶液、NBT 溶液、EDTA—Na₂ 溶液和蒸馏水,混匀后置于 4 000 lx 日光下反应 20 min;另设两支以 0.2 ml 蒸馏水代替酶液的对照管,用黑色硬纸遮光。至反应结束后,用黑布遮盖试管,以终止反应。反应终止后于 560 nm 下测光密度(OD)值。SOD 以抑制 50% NBT 发生光化学还原为 1 个酶活性单位。过氧化物酶(POD)采用愈创木酚显色法^[10]测定,取 0.2 ml 的酶液加入愈创木酚、蒸馏水和双氧水摇匀反应,最后以偏磷酸终止反应,在 470 nm 下测 OD 值。POD 以每 1 min 氧化 1 μmol 愈创木酚为 1 个酶活单位。过氧化氢酶(CAT)活性采用 H 紫外分光光度法测定^[11],每 1 min 记录 1 次,以 1 min 内 OD 240 值降低 0.1 为 1 个酶活单位。计算酶活性时叶片重量均以鲜重计。

1.4 数据处理

使用 SPSS 18.0 进行数据统计分析,并用 Duncan 法进行平均值之间的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水分和铅双重胁迫对紫穗槐苗木叶片 SOD 活性的影响

植物细胞在正常代谢过程中和在环境胁迫下均能产生活性氧和自由基, SOD 是活性氧清除反应过程中第一个发挥作用的抗氧化酶^[12], SOD 活性的增加表明植物细胞清除超氧自由基的能力增强, 植物的抗逆性也随之增强。试验结果(表 2)表明, 在单一铅胁迫处理下, 随着铅胁迫的加剧, 紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性呈先升高后降低的趋势, 且都显著高于对照(CK)处理($p < 0.05$), C 处理(铅含量为 4 000 mg/kg) SOD 活性达到最大值, 为对照的 124.06%; 在单一水分胁迫处理下, SOD 活性呈先升高后降低的趋势, T_1, T_2 处理均显著高于对照处理($p < 0.05$), T_2 处理(60% SWRC) SOD 活性达到最大值, 为对照的 122.62%; 表明单一的水分或铅胁迫对紫穗槐苗木叶

片的 SOD 活性有激活作用。在水分和铅双重胁迫处理下, SOD 活性的变化比较复杂, 但都显著高于对照($p < 0.05$), 说明双重胁迫对紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性有一定的激活作用。双重胁迫处理下, A 处理组(铅含量为 1 000 mg/kg), B 处理组(铅含量为 2 000 mg/kg)和 C 处理组(铅含量为 4 000 mg/kg)中, SOD 活性均低于相应的单一铅胁迫处理(A, B, C 处理), 说明此时水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性的诱导表现为拮抗作用; D 处理组(铅含量为 6 000 mg/kg)中, 双重胁迫下 SOD 活性均高于相应的单一铅胁迫处理(D 处理), 说明此时水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性的诱导表现为协同作用。在双重胁迫处理下, SOD 活性在 AT_1 处理达到最大值, 为对照处理的 117.58%, 且明显高于对照处理($p < 0.01$); 在 DT_2 处理达到最小值, 为对照的 105.76%。

表 2 水分和铅双重胁迫处理下紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性

U/g

Pb 含量/ (mg · kg ⁻¹)	土壤相对含水量			
	100%(CK)	80%(T ₁)	60%(T ₂)	40%(T ₃)
0(CK)	6.94 ± 0.23a	8.21 ± 0.13hi	8.51 ± 0.19ij	6.89 ± 0.32a
1 000(A)	8.38 ± 0.08hij	8.16 ± 0.13h	7.68 ± 0.13def	7.63 ± 0.15cdef
2 000(B)	8.58 ± 0.07j	7.69 ± 0.08ef	7.85 ± 0.28fg	7.35 ± 0.13bcd
4 000(C)	8.61 ± 0.27j	7.66 ± 0.30cdef	7.54 ± 0.23bcdef	7.46 ± 0.25bcde
6 000(D)	7.29 ± 0.14b	8.08 ± 0.21gh	7.34 ± 0.07bc	7.79 ± 0.32efg

注:表中数值表示平均值 ± 标准差,不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 水分和铅双重胁迫对紫穗槐苗木叶片 POD 活性的影响

POD 在生物体内的抗氧化代谢中具有关键作用, 它主要清除氧代谢中产生的 H_2O_2 以及由此产生的过氧化物 $ROOH$ ^[13], 从而保护细胞。试验结果(表 3)表明, 在单一铅胁迫处理下, POD 活性随胁迫的加剧而呈升高趋势, 在 D 处理达到最大值, 为对照的 145.93%, 但 A, B 处理与对照处理差异不显著($p > 0.05$), 说明 POD 活性对低含量的铅($\leq 2 000$ mg/kg)胁迫不敏感; 在单一水分胁迫处理下, POD 活性随胁迫的加剧呈先升高后降低的趋势, 且都明显高于对照处理($p < 0.01$), 说明 POD 活性对水分胁迫较敏感, POD 活性在 T_2 处理达到最大值, 为对照处理的 165.41%。在双重胁迫处理下, POD 活性在 AT_3 处理达到最大值, 为对照的 216.28%, 在 DT_3 处理达到最小值, 为对照的 101.45%。A 处理组(铅含量为 1 000 mg/kg)和 B 处理组(铅含量为 2 000 mg/kg)中, 在轻度水分胁迫(60% SWRC)和重度水分胁迫

(40% SWRC)处理下 POD 活性均明显高于相应的单一铅胁迫处理($p < 0.01$), 说明此时水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片 POD 活性的诱导表现为协同作用; C 处理组(铅含量为 4 000 mg/kg)和 D 处理组(铅含量为 6 000 mg/kg)中, 除 DT_3 处理的 POD 活性明显低于相应的单一铅胁迫处理(D)外($p < 0.01$), 其他双重胁迫处理的 POD 活性与相应的单一铅胁迫处理差异不显著($p > 0.05$), 说明此时水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 POD 的活性的诱导没有显著影响, C 处理组中 POD 活性高于相应的单一铅胁迫处理而 D 处理组中 POD 的活性均低于相应的单一铅胁迫处理, 可能是由于高含量的铅(6 000 mg/kg)和水分双重胁迫对 POD 本身的酶蛋白结构造成了破坏。

2.3 水分和铅双重胁迫对紫穗槐苗木叶片 CAT 活性的影响

CAT 广泛存在于各种植物组织中, 其主要功能是催化细胞内多余的 H_2O_2 分解, 使细胞内的 H_2O_2

维持在正常水平,从而使植物细胞免遭毒害,其活性的高低与植物的抗逆性有一定关联^[4,14]。试验结果(表 4)表明,在单一铅胁迫处理下,CAT 活性随胁迫的加剧呈先升高后降低的趋势,A,B,C 处理的 CAT 活性均明显高于对照($p < 0.01$),在 B 处理达到最大值,为对照的 189.50%,D 处理的 CAT 活性均明显低于对照($p < 0.01$),为对照的 26.20%,说明紫穗槐苗木叶片的 CAT 活性对铅胁迫较敏感;在单一水分胁迫处理下,CAT 活性随胁迫的加剧呈先降低后升高的趋势,且都明显高于对照($p < 0.01$),说明水分胁迫

对紫穗槐苗木叶片的 CAT 活性有激活作用。在双重胁迫处理下,各处理(除 AT₃ 处理外)的 CAT 活性均明显低于相应的单一水分胁迫处理($p < 0.01$),说明水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 CAT 活性的诱导表现为拮抗作用;当铅含量较低($\leq 2\ 000\ \text{mg/kg}$)时,各处理(除 BT₁ 处理外)的 CAT 活性均高于对照,说明此时双重胁迫对 CAT 活性有激活作用;当铅含量较高($> 2\ 000\ \text{mg/kg}$)时,各处理(除 CT₁ 处理外)的 CAT 活性均明显低于对照($p < 0.01$),说明此时双重胁迫对 CAT 活性有抑制作用。

表 3 水分和铅双重胁迫处理下紫穗槐苗木叶片的 POD 活性

U/(g·min)

Pb 含量/ (mg·kg ⁻¹)	土壤相对含水量			
	100%(CK)	80%(T ₁)	60%(T ₂)	40%(T ₃)
0(CK)	6.88±0.62a	9.56±0.73cd	11.38±0.16ef	10.73±0.84def
1 000(A)	7.72±0.82ab	7.03±0.99a	12.06±1.01f	14.88±1.13g
2 000(B)	7.80±0.87ab	9.18±1.08bcd	14.02±1.40g	13.73±1.03g
4 000(C)	8.92±0.89bc	10.44±0.38cde	8.98±0.72bc	9.00±1.11bc
6 000(D)	10.04±0.90cde	9.13±0.51bcd	9.86±0.82cde	6.98±0.73a

表 4 水分和铅双重胁迫处理下紫穗槐苗木叶片的 CAT 活性

U/(g·min)

Pb 含量/ (mg·kg ⁻¹)	土壤相对含水量			
	100%(CK)	80%(T ₁)	60%(T ₂)	40%(T ₃)
0(CK)	18.00±1.63c	40.50±1.58h	28.64±2.72f	44.47±0.25i
1 000(A)	27.67±3.94f	22.24±1.66e	18.27±2.61cd	44.08±2.74h
2 000(B)	34.11±1.76g	7.71±0.90a	21.70±2.95de	21.97±3.27e
4 000(C)	23.68±1.05e	28.44±3.40f	8.08±0.37ab	9.89±1.13ab
6 000(D)	8.49±0.50ab	7.71±1.38a	11.87±1.24b	10.51±0.62ab

3 讨论

植物在正常生长情况下,体内活性氧的产生和清除处于平衡状态,但在受到逆境胁迫时,植物细胞会产生过量的活性氧自由基,对细胞造成伤害^[15],植物经过长期的进化,自身已形成一套保护性酶系统,其中 SOD,POD 和 CAT 是植物体内重要的保护性酶,它们对于清除细胞内过量的活性氧、维持细胞的健康和稳定具有重要作用。因此,保护性酶活性的高低在一定程度上反映了植物对逆境的耐受能力。

本研究中,在单一的铅胁迫处理下,随着胁迫的加剧,紫穗槐苗木叶片的 SOD 和 CAT 活性均呈现先升高后降低的趋势,而 POD 活性一直呈现升高趋势,金璠等^[16]对小麦保护酶系统的研究结果与此一致;紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性和 CAT 活性对铅胁迫较敏感,而 POD 活性对低含量的铅($\leq 2\ 000\ \text{mg/kg}$)胁迫不敏感,陈丽娜等^[17]对花芽甜麦菜的研究结果与此一致。这说明在铅胁迫处理下,紫穗槐苗木叶片的

SOD 和 CAT 活性变化较 POD 活性而言更加迅速,是较敏感的生物指标,但在高含量的铅($\geq 2\ 000\ \text{mg/kg}$)胁迫处理下,SOD 和 CAT 活性受到一定程度的抑制,而 POD 始终维持较高的活性、清除活性氧的能力不断增加,表明 POD 在紫穗槐苗木抵抗高含量的铅($\geq 2\ 000\ \text{mg/kg}$)污染中发挥了主要作用。

在单一的水分胁迫处理下,随着胁迫的加剧,紫穗槐苗木叶片的 SOD 和 POD 活性均呈先升高后降低的趋势,而 CAT 活性呈先降低后升高的趋势,王霞等^[18]对 8 种柽柳的研究和孙国荣等^[19]对白桦实生苗的研究结果与此一致。这说明在水分胁迫下,紫穗槐苗木叶片的 SOD 和 POD 的调节能力是有限的,当胁迫超过一定限度后,细胞会因为受损而导致酶活性下降,这与植物一般的应激规律相符^[20],同时说明了水分胁迫破坏了紫穗槐保护酶系统的动态平衡,并且在水分胁迫下 SOD,POD 和 CAT 是相互协调从而起到调节作用的。

水分和铅双重胁迫下紫穗槐苗木叶片的 SOD,

POD 和 CAT 活性的变化比较复杂。当铅含量小于 6 000 mg/kg 时,水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性的诱导表现为拮抗作用,对 POD 活性的诱导表现为协同作用(除 AT₁ 处理外);当铅含量为 6 000 mg/kg 时,水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 SOD 活性的诱导表现为协同作用,对 POD 活性的诱导表现为抑制作用;水分胁迫和铅胁迫之间的交互作用对紫穗槐苗木叶片的 CAT 活性的诱导表现为拮抗作用(除 AT₃ 处理外)。双重胁迫对紫穗槐苗木叶片的 SOD 和 POD 活性有显著的激活作用(除 AT₁ 和 DT₃ 处理的 POD 活性与对照差异不显著外),对低铅含量 ($\leq 2\ 000$ mg/kg)处理的 CAT 活性有激活作用(除 BT₁ 处理外),对高铅含量 ($> 2\ 000$ mg/kg)处理的 CAT 活性有抑制作用(除 CT₁ 处理外)。说明双重胁迫诱导了 SOD 和 POD 的活性,并且在低铅含量 ($\leq 2\ 000$ mg/kg)处理下也诱导了 CAT 活性,使紫穗槐苗木在双重胁迫的逆境下产生一个强于正常条件的抗氧化酶系统,从而保护细胞,而高铅含量 ($> 2\ 000$ mg/kg)下 CAT 活性的降低有可能是由于双重胁迫导致了 CAT 本身酶蛋白结构的破坏,这也说明了紫穗槐在双重胁迫下具有较好的自我保护和调节能力,并且适度的双重胁迫(铅含量 $\leq 2\ 000$ mg/kg, 土壤相对含水量 $\geq 40\%$)有利于提高紫穗槐苗木对水分和铅双重胁迫的耐受性。

4 结论

在水分和铅双重胁迫下,紫穗槐苗木叶片的 SOD,POD 和 CAT 活性的变化表明紫穗槐苗木对双重胁迫具有良好的适应能力和调节能力,并且适度的双重胁迫(铅含量 $\leq 2\ 000$ mg/kg, 土壤相对含水量 $\geq 40\%$)有利于提高紫穗槐苗木对水分和铅双重胁迫的耐受性。同时,由于紫穗槐生物量大,生长周期长,根、茎、叶发达,具有草本植物无法比拟的优势,因此,紫穗槐具备种植于干旱、半干旱地区矿业废弃地及铅污染土壤上的潜力。本研究仅对水分和铅双重胁迫下,紫穗槐苗木生长初期叶片的抗氧化酶活性变化进行了初步探讨,其他生长阶段内叶片的抗氧化酶活性变化及其机理还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究: 战略卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003:181-188.
- [2] 郑奎, 李林. 我国铅锌矿区的重金属污染现状及治理[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30):14837-14838.
- [3] 陈红琳, 张世熔, 李婷, 等. 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累和耐性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):505-509.
- [4] 张好岩, 何丽萍, 吕果, 等. 土壤铅污染对小白菜幼苗保护酶系统的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(9):173-176.
- [5] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5):533-537.
- [6] 夏增禄, 李森照. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [7] Hisao T C. Plant responses to water stress [J]. Ann. Rev. Plant Physiology, 1973, 24(1):519-570.
- [8] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J]. 林业科学, 1996, 32(4):289-296.
- [9] 中华人民共和国水利部. SL 424—2008. 中华人民共和国水利行业标准: 旱情等级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版社, 2000.
- [11] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:166-169.
- [12] McCord J M, Fridovich I. Superoxide dismutase: An enzymatic function for erythrocyte (hemocuprein) [J]. J. Biol. Chem., 1969, 244(22):6049-6055.
- [13] 王夔. 生命科学中的微量元素: 上卷[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991:140-141.
- [14] 雷冬梅, 段昌群, 张红叶. 矿区废弃地先锋植物齿果酸模在 Pb、Zn 污染下抗氧化酶系统的变化[J]. 生态学报, 2009, 29(10):5417-5421.
- [15] Elster E F. Oxygen activation and oxygen toxicity[J]. Ann. Rev. Plant. Physiol., 1992, 43:73-96.
- [16] 金璁, 袁金萍. 铅对小麦保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2007(2):225-227.
- [17] 陈丽娜, 唐明灯, 艾绍英, 等. Pb 胁迫条件下 3 种叶菜的生长和生理响应及其抗性差异[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(4):78-83.
- [18] 王霞, 侯平, 尹林克, 等. 土壤水分胁迫对柽柳体内膜保护酶及膜脂过氧化的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 19(3):17-20.
- [19] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰, 等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(1):165-167.
- [20] 钟楠, 王进鑫, 马惠芳, 等. 水分和镉交互胁迫对刺槐幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(6):5-9.