

铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐幼苗 抗氧化酶活性的影响

李春燕^{1,2}, 王进鑫¹, 王 敏¹, 陈科皓¹, 王榆鑫¹, 宋清玉¹

(1. 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;

2. 贵州省安顺市关岭自治县环境保护局, 贵州 关岭 561300)

摘 要: 为了阐明铅胁迫下国槐和紫穗槐对干旱的生理响应机制, 进而对比两者在铅胁迫下的抗旱性, 为西北矿区耐铅型抗旱植物鉴定提供依据。通过盆栽试验, 以 1 年生的国槐和紫穗槐幼苗为材料, 以土壤相对含水量 (SRW) 100.00% 的无铅处理为对照, 其余处理外源铅浓度统一设为 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 测定不同水分胁迫强度 (土壤相对含水量 87.84%, 70.00%, 52.16%, 40.00%) 国槐和紫穗槐幼苗叶片中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 以及过氧化氢酶 (CAT) 活性的变化。结果表明: 单一铅胁迫 ($2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 下国槐和紫穗槐抗氧化酶活性高于对照; 铅和干旱复合胁迫下, SRW 87.84%、SRW 70.00%、SRW 52.16% 的处理, 随着干旱胁迫强度的升高, 国槐幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均呈先升高后降低趋势且高于对照, 紫穗槐 SOD 和 POD 活性呈先升高后降低趋势且高于对照, 而 CAT 活性呈先降低后升高趋势; SRW 为 40% 的处理下, 国槐的 SOD 和 CAT 活性显著低于对照, POD 活性略高于对照; 紫穗槐 SOD、POD 和 CAT 活性均高于对照。铅胁迫 ($2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对国槐和紫穗槐的抗氧化酶有激活作用; 铅胁迫下, 紫穗槐对干旱的抗性强于国槐。

关键词: 铅胁迫; 干旱胁迫; 国槐; 紫穗槐; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.78; S792.26 **文献标志码:** A

Effect of drought on activity of antioxidant enzymes in leaves of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings under plumbum stress

LI Chun-yan^{1,2}, WANG Jin-xin¹, WANG Min¹, CHEN Ke-hao¹, WANG Yu-xin¹, SONG Qin-yu¹

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

2. Environmental Protection Agency of Guizhou Province Anshun City Guanling County, Guanling, Guizhou 561300, China)

Abstract: This experiment aims to clarify physiological response mechanism of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings to drought under plumbum stress, and provide the basis for selecting the plumbum-resistance and drought-resistant varieties in northwestern mining area. Annual *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings were selected as test materials. A pot experiment was conducted with five soil relative water content (SRW) levels, i. e. 100.00%, 87.84%, 70.00%, 52.16% and 40.00%, and plumbum concentrations ($2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), with 100.00% of SRW without plumbum treatment as control. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxides (POD) in leaves of annual *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings were determined. For the single plumbum stress, *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings' antioxidant enzymes activity were significantly higher than those of the control. Under combined stress of drought and plumbum, for the treatments of SRW 87.84%, SRW 70.00%, SRW 52.16%, with the increase in drought stress, the activities of SOD, POD and CAT in leaves of *Sophora japonica* seedlings initially increased and then decreased, and were higher than those of the control. The same trend was found for *Amorpha fruticosa* seedlings except for the CAT activity. For the treatment of SRW40%, both activities of SOD and CAT in leaves of *Sophora japonica* seedlings decreased while the POD activity slightly increased. The activities of

收稿日期: 2015-05-24

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016KTCL03-18); 国家自然科学基金项目 (31170579)

作者简介: 李春燕 (1989—), 女, 重庆云阳人, 硕士, 主要从事生态环境工程方向研究。E-mail: lichunyan20789@126.com。

通信作者: 王进鑫 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区人工林生态系统恢复与生态修复理论研究。E-mail: jwang118@126.com。

SOD, POD and CAT in leaves of *Amorpha fruticosa* seedlings were higher than those of the control. Plumbum stress ($2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) promoted the activities of antioxidant enzymes in leaves of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* seedlings. The drought resistance of *Amorpha fruticosa* seedlings was stronger than that of *Sophora japonica* seedlings under plumbum stress.

Keywords: plumbum stress; drought stress; *Sophora japonica*; *Amorpha fruticosa*; antioxidant enzymes

我国西部地区铅、锌矿产资源丰富^[1],随着开发规模的不断扩大,矿区土壤铅污染问题日益严重,开发后废弃地的植被恢复及土壤铅污染的修复问题成为环境生态学研究的重要领域。植物修复因其成本低,效果好,不破坏环境等优点受到广泛关注^[2]。目前我国学者对铅富集植物和铅对植物生理生化特性的影响进行了大量研究^[3-5],然而其研究区域主要集中在气候适宜的南部矿区,研究对象主要是一年生的草本植物及生长周期较短的蔬菜等农作物^[6-7],关于西北地区木本耐性植物的研究很少。木本植物生物量大,生长周期长而且便于管理,在重金属修复方面潜力很大^[8]。因此,研究西北地区常见的木本植物在土壤铅污染区域的耐性和生存能力具有重要的意义。

国槐和紫穗槐是西部常见的且抗旱性较强的树种,但两者在西北矿区铅污染区域的生长及抗旱机制目前尚不清楚。植物体内的抗氧化酶活性在一定程度上能反映其抗旱能力。保护酶通过清除自由基,来抑制脂质过氧化作用,从而保护植物细胞膜不受伤害^[9-14]。周芙蓉等^[15]对此已有初步研究。王艳^[16]等采用正交试验在干旱和铅胁迫下研究了紫穗槐和刺槐以及紫穗槐平茬苗的抗氧化酶活性,得出紫穗槐的抗性优于刺槐,但对国槐并未涉及。张青^[17]等采用随机区组设计探讨了干旱和铅胁迫双重胁迫对国槐幼苗抗氧化酶活性的影响,旨在阐明干旱和铅交互胁迫对抗氧化酶活性的影响机制。本试验在上述研究的基础上,采用三因素五水平二次通用旋转组合设计重点研究重度铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐抗氧化酶活性的影响,阐明其在重度铅胁迫下对干旱胁迫的响应机制,进而对比国槐和紫穗槐在铅污染条件下对干旱的抗性,为西北矿区耐铅型抗旱植物鉴定提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 供试土壤 土壤为瘠土,通透性良好。除去石砾和林草根系后,风干过筛,并测得其基本理化性质和铅背景值如下:pH 值 8.46,有机质含量 $13.70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 60.01

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $189.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,田间持水量 22.3%,铅背景值 $16.3\pm2.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而后按试验设计向土壤中加入 99% 分析纯 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot3\text{H}_2\text{O}$ 粉末,使土壤铅浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以纯铅计),充分混匀钝化两个月后装入塑料桶中,每桶装风干土 12 kg。

1.1.2 供试植物 供试材料为一年生国槐和紫穗槐幼苗,3月初于杨凌苗圃起苗,去除基质、清洗并称量幼苗鲜重后,栽植于事前准备好的塑料桶(内径 27 cm、高 30 cm)中,边埋边压边提苗,把土壤压实后在土壤表面铺 2 kg 石子来减少土壤表面水分蒸发,正常管理并保证其成活。

1.2 试验方法

试验在陕西杨凌西北农林科技大学南校区人工旱棚内进行,外源铅浓度统一设为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,干旱胁迫强度用土壤相对含水量(土壤水分占田间持水量的百分比,SRW)表示,共设置 5 个水平。采用二次通用旋转组合设计,拟定干旱胁迫强度^[18-19]的上下水平,上水平以 Z_{2j} (田间持水量的 100%)表示,下水平以 Z_{1j} (田间持水量的 40%)表示,则零水平为:

$$Z_{0j} = (Z_{1j} + Z_{2j})/2 = 70\%$$

变化间距为:

$$\Delta j = (Z_{2j} - Z_{0j})/j = 17.84\%$$

其中, $j = 1.682$ 。所以,5 个干旱胁迫水平的编码值和实际值分别为:1.682(100%),1(87.84%),0(70%),-1(52.16%),-1.682(40%)。以土壤相对含水量(SRW)100.00%的无铅处理为对照,紫穗槐和国槐 2 个树种,每一树种由 20 个处理组成,总共 40 个处理,每个处理重复 2 次。

4 月挑选长势一致的国槐和紫穗槐苗木,采用人工适时补水和称重法进行水分控制,每 2 天称重一次,每天适时补水,以保证土壤含水量保持在一定水平上。9 月中旬采集国槐和紫穗槐幼苗叶片(从各个方位选取成熟叶片)并用液氮速冻,然后带回实验室进行超氧化物歧化酶(SOD),过氧化物酶(POD),过氧化氢酶(CAT)的活性测定。

1.3 测定指标及方法

酶液的制备:取 0.5 g 鲜叶片于预冷的研钵中,

加入 0.05 mol·L⁻¹ 的冷磷酸缓冲液 (pH = 7.8) 5 mL 和少量石英砂,冰浴研磨。至匀浆后用 0.05 mol·L⁻¹ 的冷磷酸缓冲液 (pH = 7.8) 5 mL 冲洗,并转移至离心管。10 000 r·min⁻¹ 4℃ 离心 15 min,上清液即为酶提取液,将酶液转移至试管,4℃ 冷藏保存,作为备用。

SOD 活性测定:采用氮蓝四唑(NBT)法^[20]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 OD 值。SOD 以抑制 50% NBT 发生光化学还原为 1 个酶活性单位。

POD 活性测定:采用愈创木酚显色法^[20]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 以每分钟氧化 1 μmol 愈创木酚为 1 个酶活单位。

CAT 活性测定:采用 H 紫外分光光度法^[21]测定,取 0.2 mL 酶液,加入蒸馏水和 0.3% H₂O₂ 溶液摇匀反应,在 240 nm 下测 OD 值,每分钟记录 1 次。CAT 以 1 min 内 OD₂₄₀ 值降低 0.1 为 1 个酶活单位。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SAS 软件对数据进行统计和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐幼苗 SOD 活性的影响

图 1 中,国槐和紫穗槐 SRW 为 100% 的处理 SOD 活性均高于对照,且差异显著 ($P < 0.05$),较对照分别增加了 39.1% 和 30.1%,表明 2 000 mg·kg⁻¹ 的铅胁迫对二者 SOD 活性有促进作用。随着干旱胁迫强度的增大,国槐和紫穗槐叶片 SOD 活性都呈先升高后降低的趋势。紫穗槐叶片 SOD 活性的最大值出现在 SRW 为 52.16% 的处理,达到对照的 1.55 倍,且各处理的 SOD 活性均显著 ($P < 0.05$) 高于对照,可能是由于铅和干旱的交互胁迫对紫穗槐叶片 SOD 活性有激活作用。国槐叶片 SOD 活性在 SRW 为 70% 时达到最大,是对照的 1.66 倍。除 SRW 为 40% 的处理 SOD 活性显著低于对照外,其余各个干旱胁迫水平 SOD 的活性值始终显著高于对照 ($P < 0.05$),说明铅胁迫下 SRW 为 40% 的干旱强度对国槐植株造成了一定伤害。

2.2 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐幼苗 POD 活性的影响

由图 2 可知,国槐和紫穗槐 SRW 为 100% 的处理 POD 活性均高于对照,并有显著差异 ($P < 0.05$),较对照分别增加了 114.4% 和 26.1%,可以看出 POD 在铅胁迫 (2 000 mg·kg⁻¹) 的逆境下被激活,但紫穗槐的变化比国槐的小。国槐 (除 SRW 87.84% 外) 和紫穗槐叶片 POD 活性均随干旱胁迫强度的增加呈先增后减的趋势,且各处理的 POD 活性值较对照显著升高 ($P < 0.05$)。国槐 SRW 为 87.14% 的处理 POD 活性较 SRW100% 的低 29.0%,原因可能是干旱和铅双重胁迫下国槐首先通过增加 SOD 活性来清除体内活性氧。

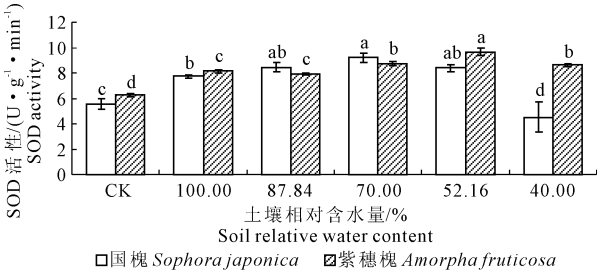


图 1 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐 SOD 活性的影响
Fig.1 Effect of drought on SOD activity in leaves of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* under plumbum stress

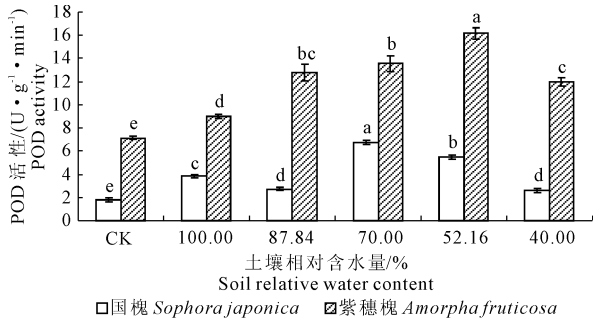


图 2 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐 POD 活性的影响
Fig.2 Effect of drought on POD activity in leaves of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* under plumbum stress

国槐叶片 POD 活性在 SRW 为 70% 处开始下降,紫穗槐叶片 POD 活性则在 SRW 为 52.16% 处才取得最大值,并达到对照的 2.27 倍,说明在同一铅胁迫 (2 000 mg·kg⁻¹) 下紫穗槐 POD 对重度干旱胁迫的适应能力比国槐强。同一干旱胁迫强度下,紫穗槐各处理 (SRW 由大到小) 的 POD 活性分别为国槐各处理 (SRW 由大到小) POD 活性的 2.32 倍、4.66 倍、2.01 倍、2.93 倍和 4.62 倍,紫穗槐叶片 POD 活性显著高于国槐叶片的 POD 活性。表明紫穗槐 POD 对铅胁迫 (2 000 mg·kg⁻¹) 的反应较国槐的敏感。

2.3 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐幼苗 CAT 活性的影响

国槐 SRW 为 100% 的处理 CAT 活性比对照升高了 35.5%,说明铅胁迫对国槐 CAT 活性升高有促进作用。SRW 87.84% 的处理较对照有显著升高($P < 0.05$),但与 SRW 为 100% 的处理无显著差异($P > 0.05$),说明国槐 CAT 活性对铅胁迫($2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下轻度的干旱胁迫(SRW 87.84%)不敏感。随着干旱胁迫强度的不断增加,国槐 CAT 活性呈下降趋势,且差异显著($P < 0.05$),SRW 52.16% 和 SRW 40% 的处理 CAT 活性显著低于对照,分别较对照降低了 47.28% 和 78.25%。可能是重度干旱胁迫和铅胁迫的交互效应对国槐叶片 CAT 酶的诱导表现为拮抗作用^[8]。紫穗槐 SRW 为 100% 的处理 CAT 活性较对照显著升高($P < 0.05$)。随干旱强度的增大,紫穗槐叶片 CAT 活性呈先降低后升高的趋势,在 SRW 87.84% 处取得最小值,在 SRW 52.16% 恢复到 SRW 87.84% 水平。SRW 40% 的处理较对照增加了 11.3%,可以看出紫穗槐叶片 CAT 活性在铅和重度干旱胁迫双重胁迫条件下依然保持较高水平。

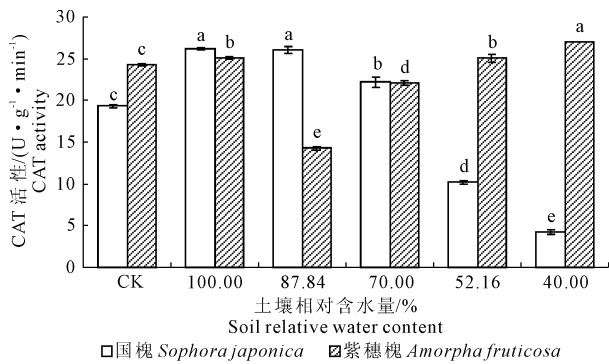


图 3 铅胁迫下干旱对国槐和紫穗槐 CAT 活性的影响
Fig.3 Effect of drought on CAT activity in leaves of *Sophora japonica* and *Amorpha fruticosa* under plumbum stress

3 讨论

本试验结果表明,在单一铅胁迫(铅浓度 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理下,国槐和紫穗槐叶片的 SOD 和 POD 活性均高于对照,说明国槐和紫穗槐均对铅胁迫具有一定耐性,这与王艳等^[16]在铅胁迫下对紫穗槐和刺槐的 SOD 活性和 POD 活性研究结果一致,但与伍欢等^[8]得出的紫穗槐 POD 活性对铅浓度 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 不敏感存在差异,这可能与所取供试土壤的 pH 值不同有关。铅胁迫下随着干旱强度的增加,国槐(除 SRW 87.84% 的处理外)和紫穗槐叶片的 SOD 活性和 POD 活性呈先升后降的趋势,这与王艳、张青^[16-17]等人的研究结果一致,但两种植物酶活性

的变化量不同,国槐的变化幅度大于紫穗槐,说明同一铅胁迫条件下干旱胁迫对国槐的影响比较大。

SRW 87.84% 处理下,国槐叶片 POD 活性显著低于单一铅胁迫,CAT 活性与单一铅胁迫无显著差异,但 SOD 活性较单一胁迫显著升高,可能是由于国槐首先通过增加 SOD 活性来抵抗逆境,这与 SOD 是植物细胞清除活性氧的第一道屏障^[17]的一般规律相符。SRW 70% 处理下,国槐叶片的 SOD 和 POD 活性较单一铅胁迫和 SRW 87.84% 的处理升高,说明铅胁迫下随着干旱强度的加剧,国槐的 POD 活性也被诱导,和 SOD 共同作用来清除体内大量的活性氧,这与魏炜等^[22]对小麦抗氧化酶的研究得出的适度的干旱胁迫可以诱导抗氧化酶活力的结论相同。SRW 87.84% 和 SRW 70% 处理下紫穗槐叶片 SOD 和 POD 活性较对照和单一铅胁迫处理升高,CAT 活性较对照和单一铅胁迫显著降低。可能是因为铅胁迫下轻度干旱对紫穗槐叶片的 SOD 和 POD 活性表现为协同作用,对 CAT 活性表现为拮抗作用,由于三种酶在逆境下是相互协调而起作用的,在 SOD 把超氧化物歧化为过氧化氢后,POD 和 CAT 在一定程度的胁迫条件能够互补来达到清除 H_2O_2 的目的^[23],因此,紫穗槐对铅和轻度干旱胁迫的耐性也得到了锻炼。

重度干旱胁迫(SRW 40%)处理下,国槐的 SOD 活性低于对照,POD 活性略高于对照,CAT 活性显著低于对照,说明国槐的抗氧化能力在下降,植株已经受到了一定程度的伤害;而 SRW 40% 处理下紫穗槐叶片的三种酶活性均高于对照,其中 CAT 活性在重度干旱条件下,随干旱强度的增加仍有升高趋势,说明同一铅胁迫条件下紫穗槐对重度干旱的耐性比国槐强。国槐的 SOD 活性和 POD 活性均在 SRW 70% 处达到最大,CAT 活性在 SRW 87.84% 处达到最大;紫穗槐的 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性取得最大值的土壤相对含水量依次为 SRW 52.16%、SRW 52.16% 和 SRW 40%。可以看出,紫穗槐的三种抗氧化酶在取得最大值时的干旱强度总是大于国槐的干旱强度,也说明同一铅胁迫条件下紫穗槐对重度干旱的耐性比国槐强。综合分析,铅胁迫下紫穗槐对干旱的抗性强于国槐。

需要指出的是,本研究只在外源铅浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下对国槐和紫穗槐幼苗的耐旱性进行了分析和比较,其它铅浓度下干旱对国槐和紫穗槐抗氧化酶活性的影响并未涉及,国槐和紫穗槐成熟苗木在铅胁迫下的抗旱机理也有待进一步研究。

4 结 论

1) 铅胁迫(外源铅浓度为 2 000 mg·kg⁻¹)对国槐和紫穗槐抗氧酶活性有激活作用,国槐和紫穗槐都具有一定的耐铅性。

2) 铅胁迫下(外源铅浓度为 2 000 mg·kg⁻¹),轻度的干旱胁迫(SRW 87.84%和 SRW 70%)能够提高国槐和紫穗槐的抗氧化能力;但重度的干旱胁迫(SRW 52.16%和 SRW 40%)对国槐幼苗造成了一定程度的伤害,而紫穗槐幼苗的抗氧化酶活性依旧处在较高水平。

3) 铅胁迫下紫穗槐对干旱的抗性强于国槐。

参 考 文 献:

[1] 陈红琳,张世熔,李 婷,等.汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(2):505-509.

[2] 吴 强,孙录科.矿区土壤重金属污染的植物修复研究进展[J].有色金属,2008,60(1):125-129.

[3] 魏朝丹,周兰英,李端平.利用观赏植物白雪姬修复铅污染的潜力研究[J].环境科学学报,2011,31(10):2290-2297.

[4] 束文圣,叶志鸿,张志权,等.华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J].生态学报,2003,23(8):1629-1639.

[5] 高红真,郭伟珍,毕 君.20 种植物对铅的耐性和富集能力研究[J].中国农学通报,2014,30(19):19-24.

[6] 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.

[7] 刘秀梅,牛俊华,王庆仁,等.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.

[8] 伍 欢,王进鑫,张 青,等.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[J].水土保持通报,2014,34(1):65-69.

[9] 刘玉英,王三根,徐 泽,等.不同茶树品种干旱胁迫下抗氧化能力的比较研究[J].中国农学通报,2006,22(4):264-268.

[10] Elster E F. Oxygen activation and oxygen toxicity[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1992,43:73-96.

[11] 王玉刚,阿不来提,齐 曼.两狗牙根品种对干旱胁迫反应的差异[J].草业学报,2006,15(4):58-64.

[12] 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.

[13] 王荣华,石 雷,汤庚国,等.渗透胁迫对蒙古冰草幼苗保护酶系统的影响[J].植物学通报,2003,20(3):330-335.

[14] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, et al. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum Demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to accumulation[J]. Chemosphere, 2006,65(6):1027-1039.

[15] 周芙蓉,王进鑫,杨 楠,等.干旱和铅交互作用对侧柏幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J].林业科学,2013,49(6):172-177.

[16] 王 艳,王进鑫,马惠芳,等.干旱和铅胁迫对刺槐和紫穗槐抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2011,26(6):24-29.

[17] 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.

[18] Hisao T C. Plant responses to water stress[J]. Ann Rew Plant Physiology, 1973,24:519-570.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 邹 琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.

[22] 魏 炜,赵欣平,吕 辉,等.三种抗氧化酶在小麦抗干旱逆境中的作用初探[J].四川大学学报(自然科学版),2003,40(6):1172-1175.

[23] 李 璇,岳 红,王 升,等.影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J].中国中药杂志,2013,38(7):973-978.

(上接第 122 页)

[33] 白红英,韩建刚,张一平.覆盖种植措施对农田土壤中 N₂O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):394-396.

[34] 韩建刚,白红英,曲 东.地膜覆盖对土壤中 N₂O 排放通量的影响[J].中国环境科学,2002,22(2):286-288.

[35] 张仁陟,王新建,毕冬梅,等.保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):115-121.

[36] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,48(0):10-19.

[37] 梁贻仓,王 俊,刘全全,等.地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):167-161.

[38] Erdeng M, Zhang G B, Ma J, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emission during wheat-growing season[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010,88(3):463-469.

[39] Narendra K L, Rattan L. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till sys-

tem[J]. Soil and Tillage Research, 2013,126(0):78-89.

[40] Liang W, Shi Y, Zhang H, et al. Greenhouse gas emissions from northeast China rice fields in fallow season[J]. Pedosphere, 2007,17(5):630-638.

[41] Setiyono T D, Walters D T, Cassman K G, et al. Estimating maize nutrient uptake requirements[J]. Field Crops Research, 2010,118(2):158-168.

[42] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原冬小麦地 N₂O 排放[J].生态学报,2011,31(7):1896-1903.

[43] McIntyre R E, Adams M A, Ford D J, et al. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009,41:92-101.

[44] 胡 腾,同延安,高鹏程,等.黄土高原南部旱地冬小麦生长期 N₂O 排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1038-1046.

[45] 梁东丽,同延安,Ove E D,等.灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(3):298-302.