

重金属 Cd Zn 对长穗偃麦草生理生化特性的影响及其积累能力研究

田小霞¹, 孟 林^{1*}, 毛培春¹, 高洪文²

(1.北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 2.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘 要:以长穗偃麦草为材料,采用土培试验方法,研究了重金属 Cd、Zn 单一及复合污染对长穗偃麦草的生物量、保护酶(SOD 和 POD)、丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)的影响,及长穗偃麦草对 Cd、Zn 的积累能力。结果表明,Cd、Zn 单一及复合污染下,长穗偃麦草生物量随 Cd 和 Zn 浓度的升高而降低,与对照存在显著差异($P<0.05$);Cd 和 Zn 单一污染下,随着 Cd、Zn 浓度的升高, SOD、POD、MDA、Pro 含量增加;Cd 和 Zn 复合污染下,随处理质量浓度的增加,SOD 呈下降趋势,POD 和 MDA 呈增加趋势。Cd10Zn200 处理下 Pro 含量减少,随 Cd 和 Zn 质量浓度的增加,其他复合处理下的 Pro 含量增加;植株根部的 Cd 和 Zn 积累量均大于地上部的积累量。综合实验结果,可初步判断长穗偃麦草能积累和忍受一定量的 Cd、Zn,Cd 和 Zn 复合污染对上述各指标的毒害效应大于同水平单元素污染的效应。长穗偃麦草根茎发达,生物量大,在生长过程中可通过生物量带走部分重金属 Cd、Zn,因此长穗偃麦草具有修复重金属 Cd 和 Zn 污染土壤的潜能。

关键词:长穗偃麦草;重金属;镉;锌;土壤污染

中图分类号:X503.233 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)08-1483-08

Effects of Cd and Zn on the Physiological and Biochemical Characteristics and Accumulation Abilities of *Elytrigia elongata*

TIAN Xiao-xia¹, MENG Lin^{1*}, MAO Pei-chun¹, GAO Hong-wen²

(1.Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

Abstract:The effects of individual and combined pollution of cadmium(Cd) and zinc(Zn) on the biomass, the antioxidant enzymes(super oxide dismutase, SOD and peroxidase, POD), the malondialdehyde(MDA) and the proline(Pro) of *Elytrigia elongata*, and its accumulation abilities for Cd and Zn were measured and analyzed using the soil potted culture experiment methods. The results showed that the biomass of *E. elongata* decreased with the increase of Cd and Zn concentration under the individual and combined pollution of Cd and Zn, and their biomass had significant differences compared with the control($P<0.05$). The contents of SOD, POD, MDA and Pro increased with the increase of Cd and Zn concentration under the individual Cd or Zn pollution. The content of SOD showed the decrease trend, POD and MDA showed the increase trend with the increase of Cd and Zn concentration under the combined Cd and Zn pollution. The content of Pro decreased at the combined pollution of Cd($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and Zn($200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), while the Pro increased with the increase of Cd and Zn concentration at the other combined pollution treatments. The accumulation contents of Cd and Zn in roots were significantly higher than the ones in shoots. The results of the present study suggested that *E. elongata* was able to accumulate and tolerate in a certain amount of Cd and Zn, and the toxic effects of Cd and Zn combined pollution were greater than the ones of individual Cd or Zn pollution at the same levels. In a conclusion, the *E. elongata* has a promising remedial potential for the light or middle levels of Cd and Zn contamination soil, because it has the well-developed rhizome and huge biomass which has the absorbing and accumulation function for Cd and Zn from the contaminated soil.

Keywords:*Elytrigia elongata*; heavy metal; cadmium; zinc; soil pollution

收稿日期:2012-02-03

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX201101003);农业部牧草种质资源保护项目

作者简介:田小霞(1980—),女,硕士,助理研究员,主要从事草业资源及其环境保护的研究。E-mail:tianxi8002@126.com

* 通信作者:孟 林 E-mail:menglin9599@sina.com

近年来,随着现代经济的快速发展,特别是工农业生产的发展,重金属以各种途径进入土壤,常见的如矿山开采,污水、废水灌溉农田,施用劣质化肥,污染灰尘沉降等活动的加剧,都使土壤重金属污染问题日趋严重^[1]。我国土壤重金属污染中,镉污染最为严重,污染面积近 10 000 hm²^[2]。镉与锌有类似的地球化学行为和环境特性,自然界中很少有纯镉出现,它总是伴生于锌矿、铅锌矿等^[3];镉、锌相伴而生,易形成复合污染,造成与单一重金属污染不同的毒性效应,影响植物的产量和质量,并通过食物链进一步影响人畜健康^[4]。

长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)是禾本科小麦族偃麦草属多年生疏丛根茎型草本植物,具有重要的利用价值,原产于欧洲东南部和小亚细亚,主要分布在我国新疆、西藏、青海、甘肃等省区,蒙古、俄罗斯、日本、朝鲜、印度和马来西亚等国也有分布^[5-7]。其根茎蔓生速度快,分蘖性和覆盖地面能力强,干草产量高达 6750~7500 kg·hm⁻²^[8]。长穗偃麦草耐旱、耐寒、耐盐、适应性广、生长势强,适于北方干旱半干旱地区的坡地、沙荒地、撂荒地、盐碱地等种植^[9-10]。目前对长穗偃麦草的研究主要集中在与小麦的远缘杂交及杂种后代鉴定等方面,并对其外部形态和田间农艺性状进行描述^[11],有关 Cd、Zn 对长穗偃麦草生理生化指标的影响及其在植物体内积累能力的研究较少。

本试验以长穗偃麦草为试验材料,研究其在 Cd、Zn 污染毒害下生理生化指标的变化规律及其在体内的分布和积累情况,对于深刻认识 Cd、Zn 复合污染对长穗偃麦草幼苗生长的毒害作用及其作用机理具有一定的指导意义,为长穗偃麦草的重金属抗性机制和利用长穗偃麦草修复重金属污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

箱子土培试验于 2010 年 2 月 28 日至 2010 年 7 月 16 日在北京农林科学院温室内进行。温室平均气温 27.6℃(白天)/18.5℃(夜晚),相对湿度 54.6%(白天)/82.7%(夜晚)。箱培用土取自北京市农林科学院试验基地,土壤理化性质:pH 为 7.42±0.23,有机质含量为 4.52%±0.45%,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.22%±0.03%、0.79%±0.05%、1.62%±0.11%,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为(134.39±13.26)mg·kg⁻¹、(4.90±0.96)

mg·kg⁻¹、(82.20±9.63)mg·kg⁻¹,土壤中 Zn 本底值为(88.55±3.21)mg·kg⁻¹,Cd 本底值为(0.57±0.08)mg·kg⁻¹。长穗偃麦草种子购买于克劳沃草业技术开发中心。

1.2 植物培养与处理

于长:宽:高=48:33:21 的塑料箱内每箱装土 25 kg,干重为 21.8 kg。试验期间不施用任何肥料。分别将分析纯 Cd(NO₃)₂·4H₂O 和 Zn(NO₃)₂·6H₂O 配制成溶液施入土壤,搅拌均匀,加水使土壤含水量为田间持水量的 60%,稳定 2 周后将长穗偃麦草催芽苗移栽入污染土壤^[12]。选取饱满、大小均一的长穗偃麦草种子,用 0.1%的高锰酸钾消毒 15 min,蒸馏水冲洗干净,置于 LRH-250-G 光照培养箱中 25℃恒温发芽,待根长 2~3 mm 时移栽入预先准备好的装污染处理土壤的塑料箱中。每箱移栽 55 株左右,至三叶期时定株到 40 株。随机排列,每天及时补充土壤水分,为防止重金属流失,塑料箱下垫塑料托盘,将渗出的溶液再返倒回塑料箱的土中。

1.3 试验设计

为探讨 Cd、Zn 轻度和中度污染产生的效应,结合实际情况将 Cd 处理浓度(以 Cd²⁺计)设置为 0、10、20 mg·kg⁻³ 3 个水平(分别以 Cd0、Cd10、Cd20 表示),Zn 浓度(以 Zn²⁺计)设置为 0、200、400 mg·kg⁻³ 3 个水平(分别以 Zn0、Zn200、Zn400 表示),试验采用完全随机区组设计,共 9 个处理,3 次重复。于 7 月 16 日,先选取植株相同部位生长状况一致的叶片,用蒸馏水洗净,揩干,液氮速冻并保存于-80℃冰箱中,用于测定各项生理指标。用自来水洗净根系泥土,用蒸馏水清洗植株,再用吸水纸吸干表面水分,于干燥通风处快速晾置 10 min,分离地上部和地下部称重,置于 90℃干燥箱中杀青 20 min,于 60℃下烘至恒重,用电子天平称取地上部和地下部干重,烘干样品用粉碎机粉碎,用于 Cd、Zn 的测定。

1.4 测定方法

地上、地下生物量用常规方法测定,叶片超氧化物歧化酶 SOD 采用氮蓝四唑(NBT)法测定^[13];过氧化物酶 POD 采用愈创木酚法测定^[13];丙二醛 MDA 含量采用硫代巴比妥法测定^[13];脯氨酸 Pro 含量测定采用磺基水杨酸法^[14];用 HNO₃:HClO₄=4:1(V:V)混合酸消解至无色透明,原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C)测定重金属含量。

数据分析与处理采用 SPSS13.0 分析软件进行 One-Way ANOVA 方差分析,并利用最小显著性差异检验(LSD)进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 Cd、Zn 污染对长穗偃麦草生物量及苗成活率的影响

从表 1 可以看出,长穗偃麦草在 Cd、Zn 单一和复合污染下,地上、地下生物量均低于对照,且均与对照存在显著差异($P<0.05$);污染处理下的苗成活率也低于对照,除 Zn200Cd0 处理与对照无显著差异($P>0.05$)外,其余处理均与对照达到显著差异($P<0.05$)。在 Cd、Zn 单一污染下,随着加入 Cd、Zn 浓度的升高,地上、地下生物量和苗成活率大体呈下降趋势(Zn0Cd20 处理除外)。复合污染在 Cd 浓度一定的情况下,随着 Zn 浓度的增加,地上、地下生物量有所下降,但与单一 Cd 胁迫相比较,无显著差异($P>0.05$)。并且各复合处理的生物量及成活率都低于同水平的单一处理。

2.2 Cd、Zn 污染对保护酶(SOD、POD)活性的影响

由图 1 可以看出,未添加外源 Cd 时,随着 Zn 浓

度的增加,SOD 酶含量先升高后降低,Zn200 处理与对照比较差异不显著($P>0.05$),但 Zn400 处理与对照差异显著($P<0.05$);添加外源 Cd10 和 Cd20 处理下,随着 Zn 浓度的增加,SOD 酶含量降低,且均差异显著($P<0.05$)。未添加外源 Zn 时,随着 Cd 浓度的增加,长穗偃麦草中 SOD 酶含量相应增加,但与对照差异不显著($P>0.05$);添加 Zn200 和 Zn400 处理下,随着加入 Cd 浓度的增加 SOD 酶含量降低,且各处理之间均达到差异显著($P<0.05$);Zn400Cd20 处理下 SOD 酶活性最低,比 Zn400Cd0 处理下降了 73.5%。

由图 1 可知,未添加外源 Cd 时,随着外源 Zn 浓度的增加致使 POD 含量增加,但与对照相比较未达到显著水平($P>0.05$);Cd10 处理下,随着外源 Zn 浓度的增加,POD 含量呈增加趋势,且均与对照差异显著($P<0.05$);Cd20 处理下,Zn 的加入导致 POD 含量先增加后减少,Zn400Cd20 处理 POD 含量虽低于 Zn200Cd20 处理,但高于 Zn0Cd20 处理,且与

表 1 Cd、Zn 对长穗偃麦草生物量及苗成活率的影响
Table 1 Effect of Cd and Zn on the biomass and survival rate of *Elytrigia elongata*

处理/mg·kg ⁻¹		地上生物量/g·株 ⁻¹	地下生物量/g·株 ⁻¹	苗成活率/%
Cd	Zn			
0	0	0.86±0.12a	0.23±0.07a	98.75±0.41a
0	200	0.54±0.09b	0.14±0.02b	96.25±1.22ab
0	400	0.51±0.01bc	0.09±0.01bc	82.50±0.82de
10	0	0.44±0.08bc	0.12±0.01bc	93.75±0.42bc
10	200	0.50±0.09bc	0.08±0.02bc	80.00±1.63e
10	400	0.44±0.02bc	0.08±0.02bc	90.00±0.82cd
20	0	0.52±0.03bc	0.10±0.01bc	93.00±0.01bc
20	200	0.40±0.04bc	0.07±0.01bc	85.00±0.83de
20	400	0.38±0.04c	0.06±0.01c	78.75±0.41e

注:LSD 多重比较,同一指标不同处理间相同字母表示无显著差异,不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。下同。

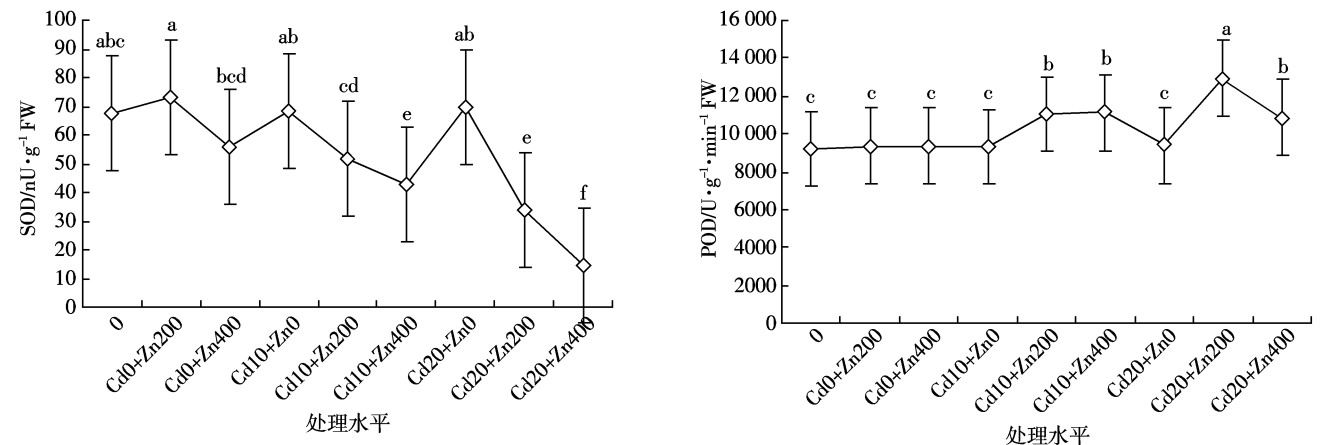


图 1 Cd、Zn 对长穗偃麦草抗氧化酶(SOD、POD)含量的影响(以鲜质量计)

Figure 1 Effect of Cd and Zn on antioxidant enzymes(SOD and POD) activities of *Elytrigia elongata*

Zn0Cd20 差异达到显著水平($P<0.05$)。未添加外源 Zn 时,随着 Cd 浓度的增加,长穗偃麦草叶中 POD 酶含量增加,但差异未达到显著水平($P>0.05$);Zn200 处理下,随着 Cd 浓度的增加,POD 含量增加,且各处理间均差异显著($P<0.05$);Zn400 处理下,Cd10 的加入导致 POD 酶含量增加,而 Cd20 的加入则导致其含量减少,且两者均与 Zn400Cd0 处理差异显著($P<0.05$)。

2.3 Cd、Zn 污染对 MDA 和脯氨酸含量的影响

由图 2 可知,未添加外源 Cd 时,随着 Zn 浓度的增加,长穗偃麦草叶中 MDA 含量呈递增趋势,Zn200 处理与对照差异不显著($P>0.05$),Zn400 处理与对照差异显著($P<0.05$),Zn200 处理与 Zn400 处理差异不显著($P>0.05$);在相同 Cd 处理浓度下,随着 Zn 浓度的增加,导致长穗偃麦草 MDA 含量增加;Zn400Cd20 处理下 MDA 含量最高,比对照提高了 85.4%。未添加外源 Zn 时,随着 Cd 浓度的增加,长穗偃麦草叶中 MDA 含量增加,且与对照差异显著($P<0.05$);在相同 Zn 处理浓度下,随着 Cd 浓度的增加,导致长穗偃麦草 MDA 含量增加。

由图 2 可看出,未添加外源 Cd 时,随着 Zn 浓度的增加致使脯氨酸含量增加,与对照均达显著水平($P<0.05$);Cd10 处理下,Zn200 的加入导致脯氨酸含量减少,而 Zn400 的加入导致其含量增加;Cd20 处理下,随加入 Zn 浓度的增加,脯氨酸含量增加。未添加外源 Zn 时,随着 Cd 浓度的增加,长穗偃麦草叶中脯氨酸含量增加,且与对照均达到显著水平($P<0.05$);Zn200 处理下,Cd10 的加入导致脯氨酸含量减少,而 Cd20 的加入则导致其含量增加;Zn400 处理下,随加入 Cd 浓度的增加,脯氨酸含量增加。

2.4 Cd、Zn 污染对长穗偃麦草地上部和根系中 Cd、Zn 积累量的影响

由表 2 可见,长穗偃麦草体内 Cd 积累量的分布为根部积累大于地上部积累。未添加 Cd 处理下,地上部与根系 Cd 的积累量呈现先上升后下降的趋势,地上部 Cd 积累在 Zn0 与 Zn200 处理下达到了显著水平($P<0.05$),但 Zn0 与 Zn400 处理下差异不显著($P>0.05$);根系 Cd 积累在 Zn0 与 Zn200 处理下差异不显著($P>0.05$),但 Zn0 与 Zn400 处理下差异显著($P<0.05$)。Cd、Zn 复合污染对地上部和根系 Cd 的积累量与对照相比较差异显著($P<0.05$),在 Zn200Cd20 处理下,地上部与根系 Cd 的积累量达到最大,分别达到了 11.29、15.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是对照的 9.10、4.73 倍。未添加 Zn 处理下,不同 Cd 浓度处理之间地上部的差异达到了显著水平($P<0.05$),根系 Cd 的积累量在 Cd10 处理与 Cd20 处理之间无显著差异($P>0.05$),但两者与 Cd0 处理之间差异显著($P<0.05$)。

长穗偃麦草的地上部和根系中 Zn 的积累随着处理浓度的增加而增加(表 2),其根部积累远大于地上部积累。在未添加 Cd 和 Cd10 处理下,地上部与根系 Zn 的积累在不同 Zn 浓度处理下均达到了显著水平($P<0.05$);添加 Cd20 处理下,Zn0Cd20 处理与 Zn200Cd20 和 Zn400Cd20 处理地上部与根系 Zn 的积累均达到了显著水平($P<0.05$),其中 Zn200Cd20 和 Zn400Cd20 处理差异不显著($P>0.05$)。Cd、Zn 复合污染对地上部和根系 Zn 的积累,在 Zn400Cd20 处理下,地上部与根系 Zn 的积累量达到最大,分别达到了 284.32、490.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是对照的 5.26、4.80 倍。未添加 Zn 浓度处理下,不同 Cd 浓度处理之间地上

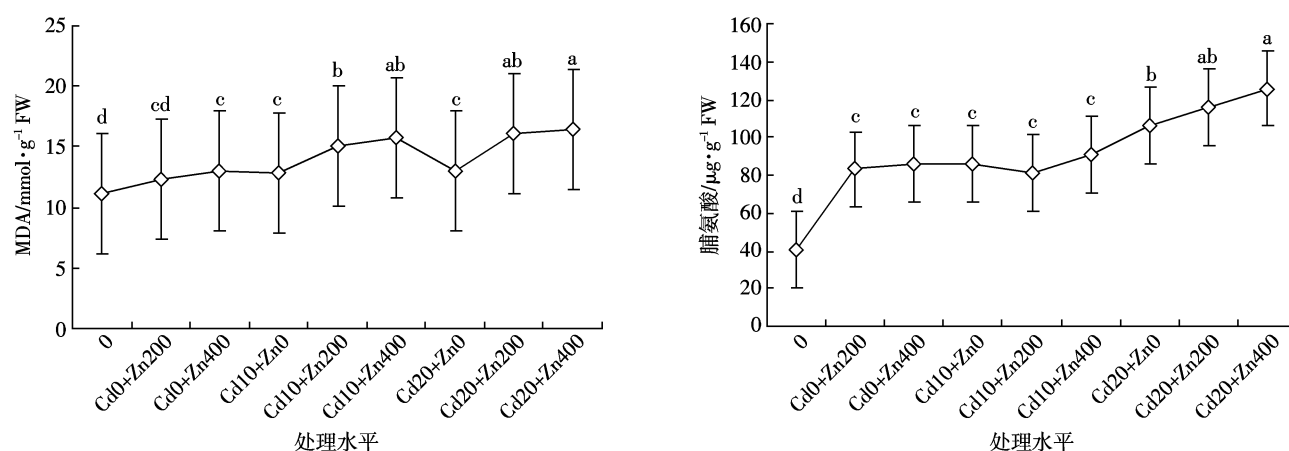


图 2 Cd、Zn 对长穗偃麦草 MDA 和脯氨酸含量的影响

Figure 2 Effect of Cd and Zn on the content of MDA and proline of *Elytrigia elongata*

表 2 Cd、Zn 对长穗偃麦草地上部和根系中 Cd、Zn 积累量的影响

Table 2 Effect of Cd and Zn on the accumulation of Cd and Zn in aerial part and root of *Elytrigia elongata*

处理/mg·kg ⁻¹		Cd 含量/mg·kg ⁻¹ DW		Zn 含量/mg·kg ⁻¹ DW	
Cd	Zn	地上部	根系	地上部	根系
0	0	1.24±0.11fg	3.26±1.17f	54.07±5.35f	102.25±5.85g
0	200	2.17±0.24e	4.61±1.91ef	146.02±8.34d	182.42±7.51f
0	400	1.05±0.12g	1.30±0.82g	208.01±9.68bc	375.43±8.49cd
10	0	5.53±1.65de	8.92±2.45cd	60.58±6.82ef	275.28±8.12e
10	200	9.84±2.34bc	10.84±3.89bcd	164.09±9.10d	380.37±9.71cd
10	400	7.15±2.48cd	8.61±3.11de	242.02±5.74ab	445.53±8.67ab
20	0	9.61±2.40bc	11.37±2.85bc	65.96±5.62e	312.21±7.86d
20	200	11.29±6.54a	15.42±2.80a	234.04±8.93abc	480.59±8.22ab
20	400	10.83±3.71ab	12.54±1.53bc	284.32±9.44a	490.37±9.30a

部 Zn 积累量在 Cd0 处理与 Cd20 处理之间达到了显著水平 ($P<0.05$), Cd10 处理与其他两处理差异不显著 ($P>0.05$); 而根系 Zn 积累量各处理之间均达到了显著差异 ($P<0.05$); 添加 Zn200 处理下, Zn200Cd0 处理与 Zn200Cd10 处理地上部 Zn 积累量差异不显著 ($P>0.05$), 但两者与 Zn200Cd20 处理差异显著 ($P<0.05$), 根系 Zn 积累 Zn200Cd0 处理与 Zn200Cd10 和 Zn200Cd20 处理均达到了显著水平 ($P<0.05$); 添加 Zn400 处理下, 地上部 Zn 积累量 Zn400Cd0 处理与 Zn400Cd20 处理均达到了显著水平 ($P<0.05$), 但与 Zn400Cd10 处理差异不显著 ($P>0.05$), 根系 Zn 积累 Zn400Cd0 处理与 Zn400Cd10 和 Zn400Cd20 处理均达到了显著水平 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 Cd、Zn 污染对长穗偃麦草生物量及苗成活率的影响

在重金属胁迫条件下, 植物的生物量可以作为评价植物对重金属耐性的间接指标, 同时生物量也直接影响重金属污染土壤的植物修复效果。目前所发现的重金属富集植物大多生物量低, 生长缓慢^[15]。无疑, 生物量高的植物种类能较好地重金属污染土壤起到修复作用^[16]。丁海东^[17]在番茄 Cd、Zn 胁迫试验中发现, 随着 Cd、Zn 胁迫浓度的增加, 番茄幼苗生长明显受抑制, 生物量、株高和叶面积下降。此外, 黄雪夏等^[18]在研究玉米吸收 Cd、Zn 试验中, 发现 Cd 用量在 4~20 mg·kg⁻¹, Zn 用量在 200~1000 mg·kg⁻¹ 的设计范围内, 玉米的生物量随 Cd、Zn 添加量的增加而下降。然而, 也有学者认为, 适当浓度的重金属可以促进植物的生长, 例如, 谢建治等^[19]在研究 Cd-Zn 复合污染对小白

菜生长的影响时发现, Zn 对小白菜的产量影响显著, 而 Cd 的影响不显著, 低含量的 Zn 与 Cd 对小白菜生物量表现为协同增产作用, 而高含量的 Zn 与 Cd 对小白菜生长表现为拮抗作用。本试验发现, 长穗偃麦草的生物量随重金属浓度的不断增加, 植株的生物量呈下降趋势; 但在低浓度污染下, 生物量降低幅度较小, 随着污染浓度的增加, 生物量明显下降。且各复合处理的生物量及成活率均低于同水平的单一处理。长穗偃麦草属于根茎类植物, 再生速度快, 分蘖性和覆盖地面能力强, 生物量大; 虽然其吸收 Cd、Zn 的能力相对较低, 但由于其生物量大, 可以连续栽种缩短修复重金属污染土壤的时间。

3.2 Cd、Zn 污染对保护酶(SOD、POD)活性的影响

保护酶活性是植物处于逆境或衰老时机体作出胁迫反应的重要生理指标, 其中 SOD 和 POD 在高等植物抗逆性、氧伤害及器官衰老中起着重要的作用^[20-21]。重金属胁迫会引起植物体内活性氧的积累, 引发生物膜脂的过氧化, 并由此产生脂质过氧化产物 MDA, 从而破坏膜系统的结构和功能^[22]。Cd 是毒性最强的重金属元素之一, Cd²⁺诱导产生活性氧造成膜脂的过氧化^[23]。Zn 作为必需元素, 当其浓度超过一定范围时对植物细胞也会表现出毒害作用^[24]。就目前关于重金属污染下植物体内 SOD 活性变化的研究来看有两种情况: 一是 SOD 活性随重金属浓度的增加而增加^[25]; 二是随着重金属浓度的增加, SOD 活性先上升后下降^[26]。由此看来, 在 Cd、Zn 两种重金属胁迫下长穗偃麦草 SOD 酶活性变化趋势基本与后者相似。

本试验中, Cd 单一处理下长穗偃麦草体内的 SOD、POD 活性升高, 有人把这种现象解释为低浓度重金属对植物的积极的“刺激作用”^[27], 其机制前人认

为是植物受胁迫过程中,活性氧可作为第二信使,启动了细胞防御反应^[29];但这种“积极作用”受到浓度和处理时间双重因素的限制。我们分析在本试验中活性氧也起到了类似作用,当 Cd 单一污染长穗偃麦草时,其叶内 SOD 和 POD 酶活性的变化均呈上升趋势,但与对照相比,差异不显著。说明长穗偃麦草对镉具有较好的耐受性,当土壤中只存在单一镉污染且含量低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,长穗偃麦草受镉的毒害作用不明显。单一 Zn 污染大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Cd-Zn 复合污染下,对 SOD 活性的影响呈降低的趋势,说明 Zn 大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 Cd-Zn 复合污染下,植物体内形成的活性氧自由基与 SOD 酶活性之间的平衡被打破,SOD 活性受到抑制,甚至失活。单一 Zn 污染下 POD 活性随着 Zn 处理浓度的增加而增加,Zn200 与 Zn400 处理下均与对照未达到显著差异。Cd-Zn 复合污染下,Zn200 中随着 Cd 的加入及 Cd10 中随着 Zn 的加入增强了 POD 酶的表达,以消除 H_2O_2 的过多积累;Zn400 中随着 Cd 的加入及 Cd20 中随着 Zn 的加入 POD 酶活性先增高后降低,但仍高于对照;Zn200Cd20 处理下 POD 活性最高,与对照相比增加了 40.50%。由此说明 POD 活性在 Cd、Zn 单一污染和 Zn200Cd10、Zn400Cd10、Zn200Cd20 复合污染下,POD 酶活性升高,Zn400Cd20 处理下,POD 酶活性降低,表明长穗偃麦草抗重金属 Cd、Zn 的生理过程与 SOD 及 POD 酶活性相关,由于抗氧化系统包含多种组分,是一个复合系统,不同的植物启动的保护机制不尽相同,因此可能激活不同的保护酶活性^[29]。

3.3 Cd、Zn 污染对 MDA 和脯氨酸含量的影响

MDA 是膜脂氧化的最终产物,通过测定 MDA 的积累可在一定程度上反映膜脂过氧化程度,从而了解植物生长受破坏的情况和植物对逆境反应的强弱^[30-31]。本研究发现,MDA 含量随 Cd、Zn 浓度的提高而增加,Cd-Zn 复合污染较同一水平 Cd、Zn 单一污染更提高了 MDA 含量,表明 Cd-Zn 复合污染较单一污染更加促进了膜脂质的过氧化。脯氨酸作为渗透调节物质和细胞质渗透物质,可保持植物受环境胁迫时的膨压,脯氨酸具有易于水合的趋势或具较强的水合能力,有助于增加细胞持水力,对原生质起着保护与保水作用;同时,它参与植物体内活性氧自由基的清除,减少重金属对细胞膜和蛋白质造成的损伤,对稳定和稳定大分子化合物也有重要作用^[32-34]。

本研究中,单一 Cd、Zn 处理下,长穗偃麦草叶片脯氨酸含量均随着 Cd、Zn 处理浓度的升高而增加,

有利于保持细胞与组织水平衡,保护膜结构完整性,减轻 Cd、Zn 胁迫的毒害。Cd-Zn 复合污染处理下,Cd10Zn200 处理导致脯氨酸含量减少,而 Cd10Zn400 处理导致其脯氨酸含量增加;Cd20Zn200 与 Cd20Zn400 处理均导致脯氨酸含量增加,而且随着加入 Zn 浓度增加,脯氨酸含量增加。可认为是复合污染下 Cd10 与 Zn200 发生拮抗作用,导致脯氨酸含量减少,在一定程度上缓解 Cd(或 Zn)的毒害作用;Cd10 与 Cd400、Cd20 与 Zn200(Zn400)发生协同作用,重金属毒害作用增加,导致渗透调节物质脯氨酸积累量增加。

3.4 Cd、Zn 污染对长穗偃麦草地上部和根系中 Cd、Zn 积累量的影响

重金属在植物体内的分布有两种情况,一种是大部分积累在根部,另一种是把根系吸收的重金属大部分运输到地上部;重金属在植物体内的运输影响植物对重金属的吸收与耐性,在植物体内各部位的分布以及植物体内的物质结合形态。一般而言,重金属在普通植物体内主要累积在根部,向地上部位转移相对较少^[35-36]。本实验中长穗偃麦草对 Cd、Zn 的吸收表现为根系>地上部的分布格局,与杨艳等^[37]对头花蓼的研究结果相符。根系积累 Cd、Zn 说明长穗偃麦草可能通过降低重金属向地上部位的迁移能力,以减轻过量的重金属对其他器官的毒害作用,从而提高植物的耐重金属能力。积累的重金属主要分布在根部,这样污染土壤中的重金属通过植被向生态系统迁移的风险相对较低。同时,长穗偃麦草属于根茎类植物,具有根茎发达,生物量大,生长快,抵抗力和固土力强的特点,是废弃地和矿区良好的植被恢复物种^[8]。长穗偃麦草,虽然其富集能力比不上很多超富集植物,但是由于它根茎发达,再生能力强,易于种植,生物量大,抗病虫害能力强,根系对土壤重金属具有较强的吸收和积累能力。这些表明长穗偃麦草具有作为土壤重金属 Cd、Zn 污染植物修复材料的潜力。但长穗偃麦草作为牧草也有不足之处,如容易被动物尤其是禽畜取食进而进入人体而造成食物链污染。因此,使用长穗偃麦草用于修复重金属污染土壤时,必须加以注意。

4 结论

(1)单一重金属 Cd、Zn 处理下,随着 Cd、Zn 浓度的增加生物量降低,复合污染后生物量下降的趋势更明显,表明 Cd-Zn 复合污染较单一胁迫对长穗偃麦草生物量的破坏作用强。

(2)Cd、Zn单一污染处理导致长穗偃麦草体内保护酶活性及MDA、脯氨酸含量增加,这是植物对重金属胁迫的解毒机制之一。长穗偃麦草对单一Cd、Zn具有较好的耐受性,当土壤中只存在单一Cd(Zn)污染且含量低于 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,长穗偃麦草受Cd(Zn)的毒害作用不明显。Cd-Zn复合污染下,使长穗偃麦草体内的保护酶SOD、POD活性比例失调,使其体内活性氧的产生和清除失衡,并有利于活性氧的产生,导致其生理代谢紊乱,这体现了重金属对植物产生毒害的重要机制。Cd-Zn复合污染较同一水平Cd、Zn单一胁迫更提高了MDA含量,更加促进了植物膜脂质的过氧化。Cd-Zn复合污染处理下,Cd10与Zn200发生拮抗作用,导致脯氨酸含量减少,在一定程度上缓解Cd(或Zn)的毒害作用;Cd10与Cd400、Cd20与Zn200(Zn400)发生协同作用,重金属毒害作用增加,导致渗透调节物质脯氨酸积累量增加。

(3)Cd-Zn复合作用十分复杂,可能因植物组织或部位不同、Cd与Zn浓度和比例不同而存在一定的差异;Cd-Zn的复合污染状态对植物毒害的协同、促进和加和作用,不容忽视。

(4)Cd与Zn在长穗偃麦草体内积累以根部积累为主,将重金属运输到地上部的能力较差。但它根茎发达,再生能力强,易于种植,生物量大,抗病虫害能力强,根系对土壤重金属具有较强的吸收和积累能力。这些表明长穗偃麦草具有作为土壤重金属Cd、Zn污染植物修复材料的潜力。

参考文献:

- [1] ROY C S, et al. Fate of heavy metals in an abandoned lead-zinc tailing pond II Sediment[J]. *Environmental Quality*, 1992, 20(4):752-764.
- [2] 王凯荣. 我国农田镉污染现状及其治理利用对策[J]. *农业环境保护*, 1997, 16(6):274-278.
WANG Kai-rong. The pollution status and countermeasures for Cd contamination of Chinese farmland[J]. *Agro-environmental Protection*, 1997, 16(6):274-278.
- [3] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environment[J]. *New York, Springer-verlag Inc*, 1986, 517.
- [4] 王宏信, 徐卫红, 刘吉振, 等. 土壤中锌镉复合污染及其植物效应研究进展[J]. *微量元素与健康研究*, 2005, 22(6):50-53.
WANG Hong-xin, XU Wei-hong, LIU Ji-zhen, et al. The advance in the research of ompound pollution of Zn and Cd in soil and its influence on plant[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2005, 22(6):50-53.
- [5] 欧巧明, 倪建福, 张正英, 等. 长穗偃麦草DNA导入引起的冬小麦后代性状变异及其遗传研究[J]. *麦类作物学报*, 2005, 25(5):18-22.
OU Qiao-ming, NI Jian-fu, ZHANG Zheng-ying, et al. Variation in winter wheat characters arising from incorporation of *E. elongata* DNA and their gentic analysis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5):18-22.
- [6] 黄莺, 毛培胜, 孟林, 等. 中间偃麦草染色体核型及C-带型的分析比较[J]. *草地学报*, 2010, 18(3):378-382.
HUANG Ying, MAO Pei-sheng, MENG Lin, et al. Analysis of the Karyotype and C-banding pattern in *Elytrigia intermedia*(Host) Nevski[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(3):378-382.
- [7] Dvorak J. Genome relationships among *Elytrigia*(=Agropyron)*elongata*, *E. stipifolia*, *E. longata* 4X, *E. caespitosa*, *E. intermedium* and *E. elongata*10X[J]. *Can J Genet Cytol*, 1981, 23:481-492.
- [8] 谷安琳. 耐盐碱栽培牧草:长穗薄冰草[J]. *中国草地*, 2004, 26(2):9.
GU An-lin. Cultivation of saline tolerance in forage grass: *Elytrigia elongata*(Host)Nevski[J]. *Grassland of China*, 2004, 26(2):9.
- [9] 张国芳, 王北洪, 孟林, 等. 四种偃麦草光合特性日变化分析[J]. *草地学报*, 2005, 13(4):344-348.
ZHANG Guo-fang, WANG Bei-hong, MENG Lin, et al. Study on the diurnal variations of photosynthetic characteristics of four *Elytrigia* Desv [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(4):344-348.
- [10] 彭远英, 宋会兴, 钟章成. 小麦中国春背景下长穗偃麦草染色体代换对苗期根系形态性状的效应[J]. *作物学报*, 2008, 34(6):1104-1108.
PENG Yuan-ying, SONG Hui-xing, ZHONG Zhang-cheng. Effects of exogenous chromosomes on root characteristics in triticum aestivum-*lophopyrum elongatum* with Chinese Spring background [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1104-1108.
- [11] 史广东, 毛培春, 张国芳, 等. 中间偃麦草和长穗偃麦草解剖结构的扫描电镜观察[J]. *草业科学*, 2009, 26(8):52-56.
SHI Guang-dong, MAO Pei-chun, ZHANG Guo-fang, et al. SEM observation on anatomical structure of *Elytrigia elongata* and *E. intermedia*[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(8):52-56.
- [12] 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 等. Cd/Zn及Cd/Zn/Ni复合污染对胡萝卜生长吸收特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(4):642-647.
ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, et al. Growth and absorption responses of carrots to Cd/Zn and Cd/Zn/Ni stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):642-647.
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:72-75.
ZOU Qi. The guidance of plant physiology experiments[M]. Beijing: Chinese Agronomy Press, 2000:72-75.
- [14] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001:258-260.
LI He-sheng. The experimental principle and technology for plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:258-260.
- [15] Lasat M M. Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms[J]. *Journal Environmental Quality*, 2002, 31:109-120.
- [16] Papayan A, Kochian L V. Identification of *Thlaspi caerulescens* genes that maybe involved in heavy metal hyperaccumulation and tolerance: Characterization of a novel heavy metal transporting TPase [J]. *Plant*

- Physiology*, 2004, 136:3814–3823.
- [17] 丁海东, 万延慧, 齐乃敏, 等. 重金属(Cd²⁺、Zn²⁺)胁迫对番茄幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. 上海农业学报, 2004, 20(4):79–82.
DING Hai-dong, WAN Yan-hui, QI Nai-min, et al. Effects of Cd²⁺ and Zn²⁺ stress on antioxidant ant enzyme system of tomato seedling[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2004, 20(4):79–82.
- [18] 黄雪夏, 白厚义, 陈佩琼. Cd、Zn 污染对玉米的毒害效应[J]. 广西农业生物科学, 2003, 22(4):280–283.
HUANG Xue-xia, BAI Hou-yi, CHEN Pei-qiong. The toxic effect of Cd, Zn on maize[J]. *Journal of Guangxi Agric and Biol Science*, 2003, 22(4):280–283.
- [19] 谢建治, 张书廷, 赵新华, 等. 潮褐土镉锌复合污染对小白菜生长的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 38(54):426–431.
XIE Jian-zhi, ZHANG Shu-ting, ZHAO Xin-hua, et al. Effects of cadmium and zinc compound pollution on the growth of non-heading chinese cabbage in cinnamon soil[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 38(54):426–431.
- [20] 李兆君, 马国瑞, 徐建民, 等. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 土壤通报, 2004, 35(2):234–238.
LI Zhao-jun, MA Guo-rui, XU Jian-min, et al. Physiological and biological mechanism of plant for adapting the stress by cadmium [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2):234–238.
- [21] 刘世鹏, 刘济明, 陈宗礼, 等. 模拟干旱胁迫对枣树幼苗的抗氧化系统和渗透调节的影响 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(9):1781–1787.
LIU Shi-peng, LIU Ji-ming, CHEN Zong-li, et al. Effects of simulated drought on antioxidative enzymes and osmotic regulation in *Zizyphus jujuba* seedlings[J]. *Acta Bot Boreali-occident Sin*, 2006, 26(9):1781–1787.
- [22] Francisco Souza J, Rauser W E. Maize and radish sequester excess cadmium and zinc in different ways[J]. *Plant Sci*, 2003, 165:1009–1022.
- [23] 黄玉山, 罗广华. 镉诱导植物的自由基过氧化损伤 [J]. 植物学报, 1997, 39(6):522–526.
HUANG Yu-shan, LUO Guang-hua. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by cadmium to plant[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(6):522–526.
- [24] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1):5–8.
XU Qin-song, SHI Guo-xin, ZHOU Hong-wei, et al. Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated oxygen in leaves of *Ottelia alismoides* (L.) Pers[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):5–8.
- [25] Cakmak, Horst J. Effect of aluminum on lipid peroxidation superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips soybean [J]. *Physiol Plantarum*, 1991, 83:463–468.
- [26] 严重玲, 洪业汤, 付舜珍. Cd、Pb 胁迫对烟草叶中抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 1998, 17(5):488–492.
YAN Chong-ling, HONG Ye-tang, FU Shun-zhen. Effect of Cd, Pb stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 17(5):488–492.
- [27] Patra J, Lenka M, Panda B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to mercury, cadmium and zinc[J]. *New Phytol*, 1994, 128:165–171.
- [28] Vera-Estrella R, Hiffins V J, Blumwald E. Plant defense response to fungal pathogens: II G-protein mediate changes in host plasma membrane redox reaction[J]. *Plant Physiol*, 1994, 106:97–102.
- [29] 钟珍梅, 黄勤楼, 王义祥, 等. 圆叶决明 (*Chamaecrista rotundifolia*) 对重金属镉胁迫的响应及镉吸收效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2287–2292.
ZHONG Zhen-mei, HUANG Qin-lou, WANG Yi-xiang, et al. Response to cadmium stress and cadmium uptake of *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2287–2292.
- [30] 于方明, 仇荣亮, 胡鹏杰. 不同 Cd 水平对小白菜叶片抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):950–954.
YU Fang-ming, QIU Rong-liang, HU Peng-jie, et al. Effects of different cadmium levels on the antioxidative enzymes activities of leaf in *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):950–954.
- [31] 蒋明义. 水分胁迫下植物体内 H₂O₂ 的产生与细胞的氧化损伤[J]. 植物学报, 1999, 41(3):329–381.
JIANG Ming-yi. Generation of hydroxyl radicals and its relation to cellular oxidative damage in plants subjected to water stress[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(3):329–381.
- [32] Costa G, Spitz E. Influence of cadmium on soluble carbohydrates, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*[J]. *Plant Sci*, 1997, 128:131–140.
- [33] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Environ & Exp Bot*, 1995, 35(4):525–545.
- [34] Tang Z C. The accumulation of free proline and its roles in water-stressed sorghum seedlings[J]. *Acta Phytophy Sin*, 1989, 15(1):105–110.
- [35] Schat H, Sharma S S, Vooijs R. Heavy metal-induced accumulation of free proline in a metal-tolerant and a nontolerant ecotype of *Silene vulgaris*[J]. *Physiol Planta*, 1997, 101:477–482.
- [36] 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态[J]. 中国环境科学, 1993, 13(4):263–268.
YANG Ju-rong, BAO Zi-ping, ZHANG Su-qin. The distribution and-binding of Cd and Pb in plant cell [J]. *China Environmental Science*, 1993, 13(4):263–268.
- [37] 杨 艳, 吴宗萍, 张 敏. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2094–2099.
YANG Yan, WU Zong-ping, ZHANG Min. A primary research on *Polygonum capitatum* absorption property and accumulation rule to heavy metal Cd [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2094–2099.