

土壤添加玉米秸秆对小麦 Pb 毒害缓解效应

邵 云¹, 柴宝玲¹, 李春喜^{1,*}, 姜丽娜¹, 蒿宝珍^{1,2}, 张黛静¹

(1. 河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453007; 2. 新乡学院, 河南新乡 453000)

摘要: 采用室内盆栽和网室盆栽的方法研究了 Pb 污染土壤上玉米秸秆对小麦幼苗生物效应、成熟期籽粒 Pb 含量和蛋白质含量以及产量性状的影响, 探讨了玉米秸秆缓解 Pb 毒害小麦的生理机制。结果表明, 添加 3g/kg 和 6g/kg 的玉米秸秆对 Pb 污染土壤上小麦幼苗生长有明显的促进作用, 能有效缓解 Pb 对小麦的毒害。具体表现为, 与对照相比, 小麦幼苗根长、芽长、植株干重增大, 叶绿素含量和根系活力升高, 过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)同工酶活性以及丙二醛(MDA)含量下降, 小麦成熟期籽粒 Pb 含量降低, 蛋白质含量以及生物产量升高。

关键词: 小麦; Pb 毒害; 玉米秸秆; 缓解

文章编号: 1000-0933(2009)04-2073-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Effects of alleviating the toxicity of Pb to wheat by adding corn stalk in polluted soil

SHAO Yun¹, CHAI Bao-Ling¹, LI Chun-Xi^{1,*}, JIANG Li-Na¹, HAO Bao-Zhen^{1,2}, ZHANG Dai-Jing¹

¹ College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang Henan 453007, China

² Xinxiang College, Xinxiang Henan 453000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2073 ~ 2079.

Abstract: Effects of corn stalk on wheat seedling, contents of Pb and protein in mature grains as well as yield properties were studied in polluted soil of Pb by in-door and out-door pot experiments. At the same time, the physiological mechanism of alleviating toxicity of Pb to wheat by corn stalk was investigated in detail. The results showed that the growth of wheat seedling was significantly promoted by adding 3g/kg and 6g/kg corn stalk into the Pb polluted soil and the toxicity of Pb to wheat was also effectively alleviated. Detailedly, compared to the control, the root length, shoot length, dry weight of plant, chlorophyll content and root activity increased by contraries of the activities decreasing of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) isoenzymes as well as malondialdehyde (MDA) content. What is more, the corn stalk could reduce the content of Pb in grains and enhance the grains protein content and biological yield.

Key Words: wheat; Pb toxicity; corn stalk; alleviation

随着全球人口的快速增长, 工业生产规模的不断扩大和城市化的快速发展, 土壤重金属污染日益严重, 造成土壤肥力退化、农作物产量降低和品质下降, 严重影响环境质量和经济的可持续发展^[1]。Pb 是环境中主要的重金属污染物, 在众多的重金属污染中, Pb 污染最为普遍; 就污染程度而言, Pb 污染仅次于 Cd, 位于第二位^[2]。目前全世界平均每年排放 Pb 约 500 万 t, 而且呈现逐年递增的趋势^[3]。国家土壤二级标准规定碱性土壤中 Pb 的含量不超过 350 mg/kg。

目前 Pb 污染土壤的修复主要采用物理技术、化学技术以及植物修复技术。根据其作用过程和机理, 物理技术主要包括土壤淋洗和动电修复; 植物修复技术包括植物稳定、植物挥发和植物提取等^[4]。但物理技术由

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD02A15, 2006BAK02A25)

收稿日期: 2007-11-02; 修订日期: 2008-06-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13703731637@sina.com

于工程量和耗资巨大而难以实施;植物修复技术是目前新兴的重金属污染修复技术,但受植物类型和地域等的限制,且多数超积累植物生长周期长、见效缓慢。目前施加改良剂仍是重金属污染土壤的重要修复途径之一。常用的改良材料包括石灰、磷酸盐、氧化铁、粉煤灰等^[5~7]。

作物秸秆是农作物的重要副产品,我国每年农作物秸秆产量达 6.2 亿 t 之多,其中玉米秸秆数量占 60%~70%,如此之多的作物秸秆,每年只有 20%~30% 被利用^[8]。尽管秸秆是一种常见、易得、重要的有机源,但是将其作为一种修复措施,用以减缓重金属对植物的毒害作用还未见报道。本试验采用玉米秸秆作为修复剂,通过室内和网室盆栽试验,研究了玉米秸秆对 Pb 污染土壤上小麦幼苗生物效应和成熟期小麦产量性状、籽粒 Pb 含量、籽粒蛋白质含量等的影响,并讨论了其减轻 Pb 毒性的机理,为使用玉米秸秆缓解 Pb 对小麦的胁迫作用,进行 Pb 污染土壤上小麦生长的修复提供了一定的理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自河南师范大学植物网室耕层土(0~20cm),耕层土壤养分含量及 Pb 浓度如表 1;玉米秸秆取自新乡郊区,烘干,粉碎,其 Pb 含量为 6.67 mg/kg;供试小麦(*Tritium aestivum* L.)品种为矮抗 58;试剂为 Pb(CH_3COO)₂·3H₂O(A. R.)。

1.2 试验设计

试验采用盆栽的方法,室内盆栽用 $\Phi 14 \times h 12\text{cm}$ 的塑料花盆,每盆装土 500g,每个处理设置的浓度梯度如表 2,试验采用完全随机设计,2 次重复。待土壤平衡 7d 后,每盆播种 30 粒,置培养条件为温度(18 ± 0.5)℃、湿度(75 ± 5)% RH、光照度 10000Lx 的全智能人工气候植物箱(HP1000GS-B 型)内培养。播后 15d,测定小麦植株的生理指标;播后 20d,测定小麦幼苗根系活力和形态指标。网室盆栽用 $\Phi 28 \times h 30\text{cm}$ 的塑料花盆,每盆装土 10kg,每个处理设置的浓度梯度如表 3,试验采用完全随机设计,3 次重复。小麦于 2006 年 10 月 21 日播种,每盆播种 30 粒,播深 5cm,于三叶期定苗 10 株,正常措施管理,2007 年 5 月 30 日收获,收获后进行考种及籽粒 Pb 含量和蛋白质含量的测定。

表 1 供试土壤养分及 Pb 含量

Table 1 The nutrition and Pb content of the soil in experiments

土壤类型 Soil type	pH	全氮 Total N (g/kg)	速效氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	全铅 Total Pb (mg/kg)
两合土	7.94	0.58	72.92	9.71	39.31	2.47	11.43

1.3 测定方法

1.3.1 形态指标的测定

播后 20d,取各处理小麦幼苗全株,洗净后分为根、芽两部分,随机取 10 株测定幼苗芽长和根长,105℃杀青 30min,85℃烘至恒重后称量其干重。

1.3.2 生理指标的测定

播后 15d,取各处理小麦幼苗叶片,洗净;MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[9];叶绿素含量的测定采用丙酮-无水乙醇浸提法^[10];过氧化物歧化酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)同工酶活性检测采用聚丙烯酰胺凝胶电泳法^[11]。播后 20d,取各处理小麦幼苗根系,洗净;根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[12]。

1.3.3 Pb 含量的测定

秸秆依次用自来水、蒸馏水、去离子水洗净后,于 60~80℃烘至恒重,用 FZ102 微型植物试样粉碎机粉碎,小麦籽粒经 JXFM110 锤式旋风磨粉碎,土壤样品充分混合后自然风干,粉碎,过筛,采用 HNO₃-HClO₄ 消解法消解。消解后用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 TJA 公司生产,IRIS Advantage 型)测定植株和土壤样

品的全 Pb 含量。

表 2 室内盆栽试验的浓度设置

Table 2 The concentrations of the treatments in in-door pot experiments

处理 Treatments		Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O (mg/kg, 以 Pb 元素计)		
		0	350	600
玉米秸秆	0	0+0(对照, CK)	0+350	0+600
Corn stalk	3.0	3.0+0	3.0+350	3.0+600
(g/kg)	6.0	6.0+0	6.0+350	6.0+600
	8.0	8.0+0	8.0+350	8.0+600

表 3 网室盆栽试验的浓度设置

Table 3 The concentrations of the treatments in out-door pot experiments

处理 Treatments		Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O (mg/kg, 以 Pb 元素计)		
		0	350	600
玉米秸秆	0	0+0(对照, CK)	0+350	0+600
Corn stalk	4.0	4.0+0	4.0+350	4.0+600
(g/kg)				

1.3.4 蛋白质含量测定

半微量凯氏定氮法。

1.3.5 考种

测定小麦株高、穗长、结实小穗数、穗粒重、千粒重和生物产量。

试验结果用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗形态指标的影响

由图 1 可知,350mg/kg 单一 Pb 处理对小麦幼苗芽长和根长均有轻微的促进作用,对小麦幼苗芽重和根重则表现为抑制作用;600mg/kg 单一 Pb 处理对小麦幼苗芽长、根长、芽重和根重均表现为抑制作用,分别比对照降低了 3.7%、3.4%、15.4%、30.8%。当 Pb 为 0mg/kg 时,随着玉米秸秆用量的增加,小麦幼苗的芽长、根长、芽重和根重呈现先升高后降低的趋势;当 Pb 为 350mg/kg 时,添加 3g/kg 和 6g/kg 的玉米秸秆促进了芽长和根长的增长,而不同用量玉米秸秆对芽重和根重均有促进作用;当 Pb 为 600mg/kg 时,不同用量玉米秸

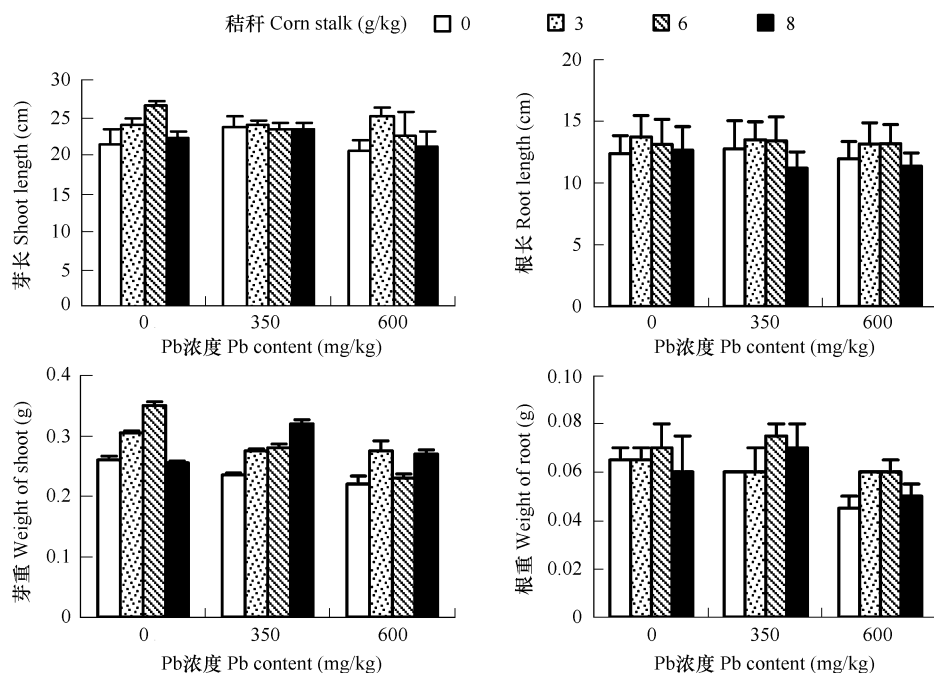


图 1 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗芽长、根长、芽重、根重的影响

Fig. 1 Effects of corn stalk on the lengths and weights of wheat shoot and root with Pb stress

秆对 Pb 胁迫均有一定的缓解作用,其中以 3g/kg 玉米秸秆对根长、芽长、根重、芽重的缓解作用最大,分别比对照增加了 9.9%、21.6%、33.3%、25%。由此可知,在轻度 Pb 污染的土壤(350mg/kg)上,添加 3g/kg 或 6g/kg 的玉米秸秆能有效缓解小麦幼苗的 Pb 毒害;在重度 Pb 污染土壤(600mg/kg)上,添加 3g/kg 的玉米秸秆对小麦幼苗的芽长、根长、芽重和根重的缓解作用最大。

2.2 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗生理指标的影响

由图 2 可以看出,350mg/kg 单一 Pb 处理降低了小麦幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素(a+b)含量和根系活力,但对叶绿素 b 含量稍有促进作用,MDA 含量稍有增加;而 600mg/kg 单一 Pb 胁迫下,小麦幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素(a+b)含量以及根系活力均显著降低,而 MDA 含量显著升高。表明高浓度的 Pb 不利于小麦幼苗的生长。当 Pb 为 0mg/kg 时,不同用量玉米秸秆均增加了小麦幼苗叶绿素 b 含量,其中添加 3g/kg 和 6g/kg 的玉米秸秆使小麦幼苗的根系活力显著增加,MDA 含量显著降低;玉米秸秆用量继续增加到 8g/kg 时,反而降低了小麦幼苗叶绿素 a 含量、总叶绿素含量和根系活力,对小麦幼苗的生长不利。当 Pb 为 350mg/kg 时,不同用量玉米秸秆对叶绿素 a 含量影响不大,6g/kg 玉米秸秆处理显著升高了叶绿素 b 和总叶绿素含量,分别比对照增加了 13% 和 10%,同时使根系活力达到最大,为对照的 173%,MDA 含量显著降低,与对照相比降低了 35%。说明在轻度 Pb 污染土壤上,添加 6g/kg 的玉米秸秆修复效果最好。当 Pb 为 600mg/kg 时,3g/kg 的玉米秸秆处理增加了叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量,分别比对照增加了 4.9%、8.1% 和 5.7%,而不同用量玉米秸秆均增加了根系活力并降低了 MDA 含量,其中以 3g/kg 和 6g/kg 的玉米秸秆处理效果最好。说明在重度 Pb 污染土壤上,3g/kg 玉米秸秆处理能有效缓解 Pb 对小麦的毒害作用。

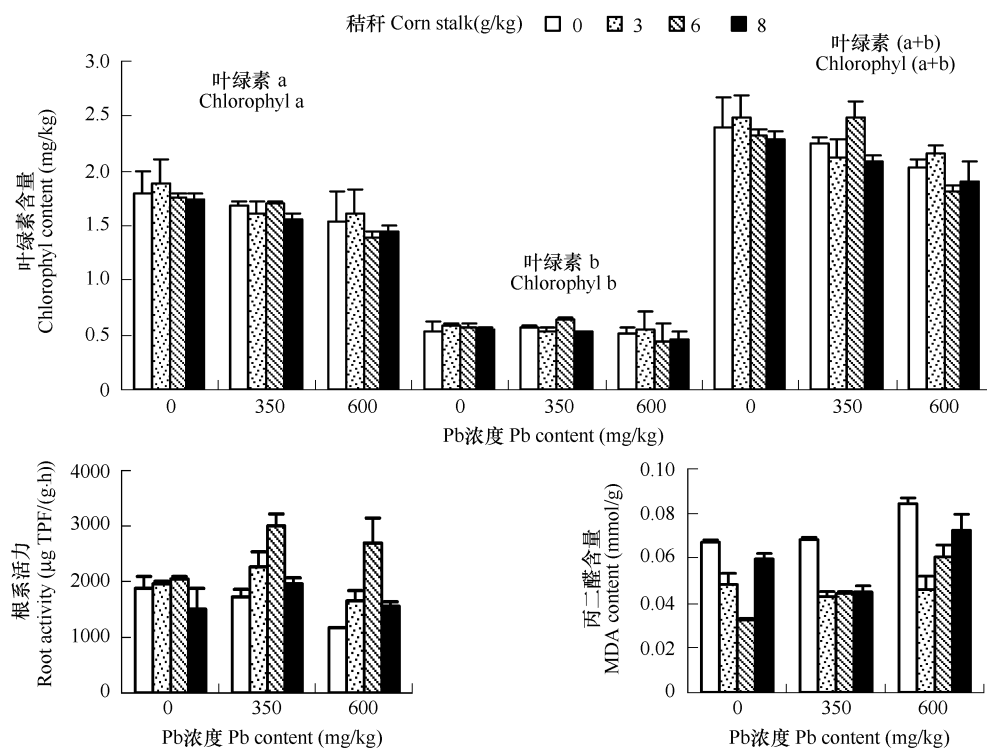


图 2 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗叶绿素含量、根系活力和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effects of corn stalk on contents of chlorophyll and MDA and root activity in wheat with Pb stress

2.3 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗 POD、SOD 同工酶的影响

对电泳图谱(图 3)分析可知,本试验中,不同浓度 Pb 处理、不同添加量玉米秸秆处理下小麦幼苗均表达 5 条 POD 同工酶区带: I 区、II 区、III 区、IV 区、V 区,其中 I 区至少包括 2 条酶带(2 条强带),II 区包括 1 条强带和 1 条弱带,III 区包括 1 条弱带、1 条强带和 1 条次强带,IV 区包括 1 条强带,V 区至少包括 1 条弱带。对于

SOD 同工酶来说,不同浓度 Pb 处理、不同添加量玉米秸秆处理下小麦幼苗均表达 6 条同工酶区带,其中 V 区和 VI 区是染色时最先出现的 2 条酶带,也是最亮的酶带,属于强带,Ⅲ区和Ⅳ区是染色时最晚出现的 2 条酶带,属于弱带。不同处理中,POD 同工酶活性以 C2P0、C3P0、C1P1、C1P2、C2P2 几个处理的较低;SOD 同工酶活性则以 C2P0、C0P1、C1P2、C2P2 几个处理的较低,表明不同玉米秸秆处理可降低 POD 和 SOD 同工酶活性。而 C0P2 处理的 POD 和 SOD 活性均较高,说明 600mg/kg Pb 处理已经对小麦幼苗产生了毒害效应。当 Pb 为 350mg/kg 时,C1P1 处理的 POD 和 SOD 同工酶活性均降低;当 Pb 为 600mg/kg 时,C1P2、C2P2 处理的 SOD 同工酶活性降低,说明添加 3g/kg 和 6g/kg 的玉米秸秆能有效减缓 Pb 胁迫下小麦幼苗体内氧自由基的增加,减轻了小麦幼苗受 Pb 的毒害,增强了其适应外界环境的能力。

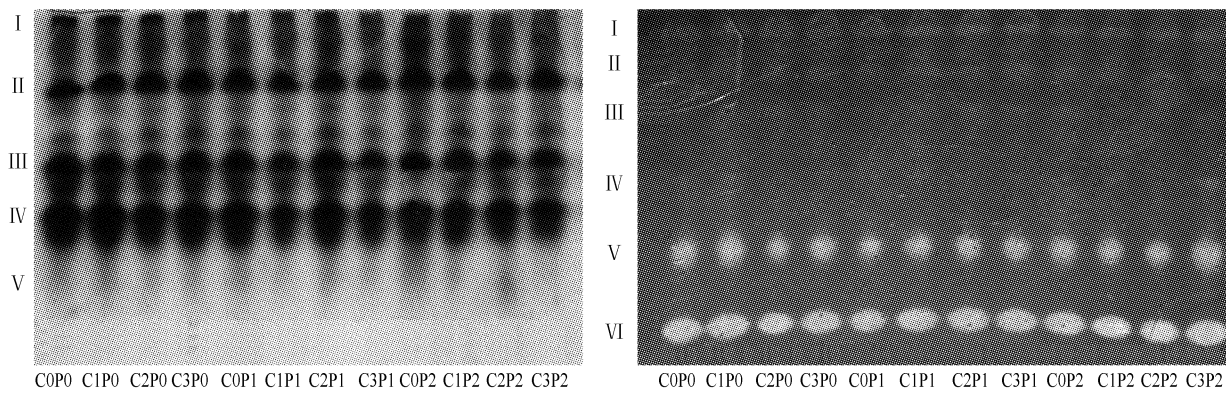


图 3 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦幼苗叶片 POD 同工酶和 SOD 同工酶的影响

Fig. 3 Effects of corn stalk on the POD and SOD isoenzymes of wheat seedling with Pb stress

图中 C 表示玉米秸秆,0、1、2、3 表示秸秆处理浓度分别为 0 g/kg、3.0 g/kg、6.0 g/kg、8.0 g/kg;P 表示 Pb,0、1、2 表示 Pb 处理浓度分别为 0 mg/kg、350 mg/kg、600 mg/kg In Fig.3, “C” represented corn stalk, and 0, 1, 2, 3 represented the corn stalk content 0 g/kg, 3.0 g/kg, 6.0 g/kg, 8.0 g/kg respectively; “P” represented Pb, and 0, 1, 2 represented the Pb content 0 mg/kg, 350 mg/kg, 600 mg/kg respectively

2.4 玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦成熟期土壤和籽粒 Pb 含量、籽粒蛋白质含量以及产量性状的影响

由表 4 可以看出,与对照相比,添加 4g/kg 玉米秸秆使成熟期小麦籽粒 Pb 含量降低,蛋白质含量升高。

表 4 秸秆对 Pb 胁迫下小麦籽粒 Pb 含量、籽粒蛋白质含量以及产量性状的影响

Table 4 Effects of corn stalk on Pb content, protein content of grains and yield characters with Pb stress

指标 Indexes	秸秆 (g/kg) Corn stalk	Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O (mg/kg, 以 Pb 元素计)			F 值		
		0	350	600			
籽粒 Pb 含量(mg/kg)	0	0.50	0.64	1.01	$F_{Pb} = 116.626^{**}$	$F_{CS} = 33.493^{**}$	$F_{Pb-CS} = 294.008^{**}$
Grains Pb content	4.0	0.35	未检出	0.53			
蛋白质含量(%)	0	13.53	15.56	14.90	$F_{Pb} = 18.326^{**}$	$F_{CS} = 181.271^{**}$	$F_{Pb-CS} = 59.713^{**}$
Protein content	4.0	16.32	15.72	15.97			
株高(cm)	0	63.25	64.59	66.01	$F_{Pb} = 1.092$	$F_{CS} = 8.716^{**}$	$F_{Pb-CS} = 2.027$
Plant height	4.0	66.77	68.24	66.10			
穗长(cm)	0	9.09	9.07	9.03	$F_{Pb} = 0.917$	$F_{CS} = 0.929$	$F_{Pb-CS} = 0.867$
Spike length	4.0	9.07	9.47	9.08			
结实小穗数	0	15.83	16.90	15.63	$F_{Pb} = 3.514^{*}$	$F_{CS} = 3.057$	$F_{Pb-CS} = 0.235$
Bearing spikelet	4.0	16.80	17.17	16.30			
穗粒重(g)	0	2.00	1.77	1.67	$F_{Pb} = 0.565$	$F_{CS} = 18.682^{**}$	$F_{Pb-CS} = 2.807$
Spikelet weight	4.0	2.23	2.88	3.08			
生物产量(g/盆)	0	84.00	79.67	78.00	$F_{Pb} = 10.544^{**}$	$F_{CS} = 13.976^{**}$	$F_{Pb-CS} = 1.989$
Biology yield	4.0	102.67	94.00	85.00			
千粒重(g)	0	39.01	40.38	38.31	$F_{Pb} = 3.374$	$F_{CS} = 11.366^{**}$	$F_{Pb-CS} = 15.666^{**}$
1000 grains weight	4.0	39.46	39.56	42.63			

* 为显著($p < 0.05$); ** 为极显著($p < 0.01$);CS 为玉米秸秆 * significant at 0.05 level ($p < 0.05$); ** significant at 0.01 level ($p < 0.01$); “CS” represented the corn stalk

其中,当 Pb 为 350mg/kg 时,4g/kg 玉米秸秆处理下籽粒蛋白质含量比对照升高了 1.02%,而籽粒中 Pb 含量未检出;当 Pb 为 600mg/kg 时,4g/kg 玉米秸秆处理下籽粒 Pb 含量比对照降低了 61.4%,籽粒蛋白质含量则比对照升高了 7.18%;且对于籽粒 Pb 含量和蛋白质含量两项指标来说,无论是 Pb 处理间、玉米秸秆处理间,还是二者交互作用间差异均达到极显著水平。同时,玉米秸秆对 Pb 胁迫下小麦成熟期产量性状的影响结果表明,无论是 350mg/kg 还是 600mg/kg 单一 Pb 处理,均降低了小麦成熟期的穗长、穗粒重和生物产量,而结实小穗和千粒重则呈现“低促高抑”的趋势。对于玉米秸秆来说,4g/kg 处理促进了小麦株高、结实小穗、穗粒重、生物产量以及千粒重的升高,其中株高、穗粒重、生物产量和千粒重四项指标在不同秸秆处理间的差异达到极显著水平。综合两方面,当 Pb 为 350mg/kg 时,添加 4g/kg 玉米秸秆使小麦成熟期株高、穗长、结实小穗数、穗粒重和生物产量分别比对照增加了 5.65%、4.41%、1.60%、62.71% 和 17.99%;当 Pb 为 600mg/kg 时,添加 4g/kg 玉米秸秆则使株高、穗长、结实小穗数、穗粒重、生物产量和千粒重均有提高,其中结实小穗数、穗粒重、生物产量和千粒重分别比对照增加了 4.29%、84.43%、8.97% 和 11.3%。总的来说,无论是轻度 Pb 污染还是重度 Pb 污染,4g/kg 玉米秸秆处理均能显著降低籽粒 Pb 含量,并且使产量性状也得到了不同程度的改善。

3 讨论

根据本试验研究结果,综合形态指标、生理指标、产量性状等,在轻度 Pb 污染土壤(350mg/kg)上,添加 3g/kg 或者 6g/kg 玉米秸秆能显著促进幼苗的根长、芽长、根重、芽重;添加 6g/kg 玉米秸秆则促进了小麦幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量以及总叶绿素含量的增加,并使根系活力达到最高,显著降低了 MDA 含量;添加 4g/kg 玉米秸秆处理显著改善了产量性状并明显降低了籽粒 Pb 含量。说明在轻度 Pb 污染土壤上,施加 3~6g/kg 的玉米秸秆较为适宜,在农业生产中相当于每公顷施用玉米秸秆 4350~8700kg。而在重度 Pb 污染土壤(600mg/kg)上,添加 3g/kg 玉米秸秆能显著缓解小麦幼苗的 Pb 毒害;添加 4g/kg 玉米秸秆能使产量性状得到不同程度的改善,同时也降低了籽粒 Pb 含量。说明添加 3~4g/kg 玉米秸秆能有效缓解重度 Pb 污染土壤上小麦 Pb 毒害,在农业生产中相当于每公顷施用玉米秸秆 4350~5775kg。

本试验中,无论是轻度 Pb 污染还是重度 Pb 污染对小麦根系的生长均不利,分析其原因,可能是小麦首先通过根系吸收 Pb,较高浓度的 Pb 导致根系质膜的完整性和选择透性受损,使细胞透性增大^[13]。另外 Pb 胁迫还可以引起植物对氮、磷、钾等大量营养元素吸收和再运输效率下降,从而导致它们参与体内物质和代谢的异常^[14]。本试验研究结果表明,玉米秸秆不仅能促进小麦植株的生长,而且能显著缓解小麦 Pb 毒害。分析其原因,这可能由于玉米秸秆中含有大量的纤维素、木质素、淀粉、粗蛋白、酶等有机物,还含有氮、磷、钾等营养元素,一方面补充了 Pb 胁迫下氮、磷、钾等营养元素,另一方面由于纤维素分子量大,内聚力也较大,扩散能力差,溶解性低,故能吸附大量的 Pb 元素,进而使土壤中 Pb 的有效性降低。另外,前人试验结果表明秸秆还田不仅可以改善土壤肥力,增加土壤有机质等养分的含量,还可以提高土壤脲酶、磷酸酶等的活性^[15,16],因此,推测玉米秸秆在一定程度上改善了 Pb 污染土壤的理化性状,并进一步加速了土壤中 Pb 的老化,进而使小麦受胁迫的程度降低。本试验中 3g/kg 和 6g/kg 玉米秸秆处理降低了 POD 和 SOD 两种酶同工酶的活性,表明植物体内活性氧自由基水平的下降,即受胁迫的程度减轻^[17~19],说明 3g/kg 和 6g/kg 玉米秸秆处理缓解了 Pb 对小麦幼苗的毒害作用。

目前,重金属 Pb 污染治理多采用施用粉煤灰、碳酸钙等。本试验研究结果表明玉米秸秆不仅能促进小麦的生长而且能有效缓解小麦 Pb 毒害。玉米秸秆作为一种常见的有机源,资源丰富,将其作为一种修复措施,不仅操作简单易行、成本低廉而且还能保护环境,有很好的应用前景。然而单一重金属元素污染土壤在现实中并不多见,而且农业生产中很多生产措施都会影响重金属的行为,因此不同措施的交互作用对重金属复合污染的修复效果,及其修复机制还有待进一步试验研究和深入探讨。

References:

- [1] Yang S C, Nan Z R, Zeng J J. Current situation of soil contaminated by heavy metals and research advances on the remediation techniques. *Journal*

- of Anhui Agri. Sci., 2006, 34(3): 549—552.
- [2] Sun G W, Zhu Z J, Fang X Z, *et al.* Current status and prevented measures of heavy metal pollution of vegetable in China. Northern Horticulture, 2006, 2006(2): 66—67.
- [3] Zhou Z Y. Heavy metal contamination in vegetables and their control in China. Development of Research Network for Natural Resources Environment and Ecology, 1999, 10(3): 21—27.
- [4] Long X X, Yang X E, Ni W Z. Current situation and prospect on the remediation of soils contaminated by heavy metals. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 757—762.
- [5] Zhou Q, Peng F Q, Huang X H, *et al.* Effect of La-Gly on the growth of *Brassica chinensis* seedling under Cd stress. Agro-Environmental Protection, 1997, 16(6): 245—246.
- [6] Chen Z S, Lee G J, Liu J C. The effects of chemical remediation treatments on the extractability and speciation of cadmium and lead in contaminated soils. Chemosphere, 2000, 41(1-2): 235—242.
- [7] Querol X, Alastuey A, Moreno N, *et al.* Immobilization of heavy metals in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. Chemosphere 2006, 62(2): 171—180.
- [8] Ma Y L, Shi H K, Zhang S K, *et al.* Whole maize straw addition: the changes of soil physical and chemical properties and the effect on winter wheat. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(supplement): 42—46.
- [9] Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Plant Physiology. Modern Plant Physiology Experiment Enchiridion. Beijing: Science Press, 1999. 305—306.
- [10] Zhang X Z. Determination of phytoplankton chlorophyll content-acetone ethanol extraction. Shenyang: Liaoning Agricultural Press, 1986. (3): 26—28.
- [11] Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Plant Physiology. Modern Plant Physiology Experiment Enchiridion. Beijing: Science Press, 1999. 264—265, 305, 306, 308, 314.
- [12] Zhang Z L, Qu W J. Plant Physiology Experiment Enchiridion. Beijing: Higher Education Press, 2004. 39—41.
- [13] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, *et al.* The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 634—638.
- [14] An Z Z, Wang X C, Shi W M, *et al.* Plant physiological responses to the interactions between heavy metal and nutrients. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(4): 392—396.
- [15] Zhang D X, Han Z Q, Liu W, *et al.* The effect of maize stock returning on the dynamic changes of soil enzyme activities under different decay conditions. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(3): 475—478.
- [16] Zhao S S, Zhang X Q, Jia S M, *et al.* Influence of returning whole corn stalk into soil on wheat growth and its yield. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 145—147.
- [17] Geebelen W, Vangronsveld J, Adriano D C, *et al.* Effect of Pb-EDTA and EDTA on oxidative stress reactions and mineral uptake in *Phaseolus vulgaris*. Physiologia Plantarum, 2002, 115(3): 377—384.
- [18] Capell T, Bassie L, Christou P. Modulation of the polyamine biosynthetic pathway in transgenic rice confers tolerance to drought stress. Pnas, 2004, 101(26): 9909—9914.
- [19] Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K, Seki M. Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses. Curr Opin Plant Biol, 2003, 6(5): 410—417.

参考文献:

- [1] 杨苏才, 南忠仁, 曾静静. 土壤重金属污染现状与治理途径研究进展. 安徽农业科学, 2006, 34(3): 549~552.
- [2] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 我国蔬菜重金属污染现状及治理措施. 北方园艺, 2006, 2006(2): 66~67.
- [3] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制. 资源生态环境网络研究动态, 1999, 10(3): 21~27.
- [4] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757~762.
- [5] 周青, 彭方晴, 黄晓华, 等. 镉对小白菜生长的影响与 La-Gly 的防护效应. 农业环境保护, 1997, 16(6): 245~246.
- [8] 马永良, 师宏奎, 张书奎, 等. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响. 中国农业大学学报, 2003, 8(增刊): 42~46.
- [9] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999. 305~306.
- [10] 张宪政. 植物叶绿素含量测定-丙酮乙醇浸提法. 沈阳: 辽宁农业出版社, 1986, (3): 26~28.
- [11] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999. 264~265, 305, 306, 308, 314.
- [12] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2004. 39~41.
- [13] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 小麦根际铅、镉的生态效应. 生态学报, 2000, 20(4): 634~638.
- [14] 安志装, 王校常, 施卫明, 等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应. 土壤与环境, 2002, 11(4): 392~396.
- [15] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 不同促腐条件下秸秆直接还田对土壤酶活性动态变化的影响. 土壤通报, 2006, 37(3): 475~478.
- [16] 赵四申, 张西群, 贾素梅, 等. 玉米秸秆整株还田对小麦生长发育及产量的影响. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 145~147.