

粉煤灰和碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量 性状及麦株 As 含量的影响

邵云^{1,2}, 李万昌², 侯小丽², 姜丽娜², 姚利娇², 李春喜², 李建民¹

(1.中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 2.河南师范大学 生命科学院, 河南 新乡 453007)

摘要:随着经济的发展,土壤 As 污染问题日益严重。采用露天盆栽试验方法,研究了在 As(Ⅲ)污染土壤上,添加粉煤灰和碳酸钙对小麦成熟期产量及其性状、小麦根、茎叶和籽粒 As 含量的影响,并探讨了粉煤灰和碳酸钙对土壤 As(Ⅲ)污染修复的有效方法。结果表明,在土壤中添加 100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰或 1.0 g·kg⁻¹ 的碳酸钙能使小麦株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量增加。与对照相比,在 As(Ⅲ)污染土壤上,100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理显著地增加了小麦产量($P<0.05$),极显著地降低了小麦籽粒 As 含量($P<0.01$);1.0 g·kg⁻¹ 的碳酸钙处理极显著地增加了小麦的穗粒数、千粒重和产量($P<0.01$),显著地降低了根中 As 含量($P<0.05$),极显著地降低了籽粒 As 含量($P<0.01$)。因此,在 As(Ⅲ)污染土壤上,添加 100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰或 1.0 g·kg⁻¹ 的碳酸钙能使小麦产量升高,籽粒 As 含量下降,有效地缓解 As(Ⅲ)对小麦的毒害。

关键词:小麦; As(Ⅲ)污染; 粉煤灰; 碳酸钙; 产量; 含量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)09-1784-05

Effect of Coal Fly Ash and Calcium Carbonate on Yield Constituents and As Content of Wheat in As(Ⅲ) Contaminated Soil

SHAO Yun^{1,2}, LI Wan-chang², HOU Xiao-li², JIANG Li-na², YAO Li-jiao², LI Chun-xi², LI Jian-min¹

(1.College of Agronomy and Biotechnology, China Agriculture University, Beijing 100094, China; 2.College of Life Sciences, He'nan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: With the development of economy, contamination of As become more and more serious. Effects of coal fly ash (CFA) and calcium carbonate (CaCO₃) on yield constituents and As content of root, stem, leaf and grain of wheat in As(Ⅲ) contaminated soil were studied in pot experiments. Effective measures of remediation with coal fly ash and calcium carbonate in As(Ⅲ) contaminated soil were discussed deeply in this paper. The results showed that treatments of coal fly ash (100 g·kg⁻¹) or calcium carbonate (1.0 g·kg⁻¹) promoted height of wheat, bearing spikelets, grains per spike, 1 000 grains weight and yield. In As(Ⅲ) contaminated soil, compared to the control, yield was increased significantly ($P<0.05$) and content of As of grain was decreased highly significantly ($P<0.01$) with treatment of 100 g·kg⁻¹ coal fly ash; grains per spike, 1 000 grains weight and yield were increased highly significantly ($P<0.01$), content of As of root was decreased significantly ($P<0.05$) and content of As of grain was decreased highly significantly ($P<0.01$) with treatment of 1.0 g·kg⁻¹ calcium carbonate. Therefore, adding 100 g·kg⁻¹ coal fly ash or 1.0 g·kg⁻¹ calcium carbonate in As(Ⅲ) contaminated soil could effectively alleviate toxicity of As(Ⅲ) to wheat such as improving wheat yield and reducing As content of wheat grain.

Keywords: wheat; As(Ⅲ) contamination; coal fly ash; calcium carbonate; yield; content

农田环境污染以及由此产生的对农作物和人体健康的威胁是当今世界普遍关注的问题, 有毒元素

污染及防治是当前环境污染研究中的一个重要课题。砷(As)是生态环境中主要的污染物之一,是土壤中的类金属污染物^[1]。随着现代化工业的发展,废水废渣的大量排放,含砷农药、除草剂及化肥等化学试剂的大量施用,土壤砷污染日趋严重^[2-3]。砷的污染在世界各地常见报道,并被国内外列为优先污染物,如在日本,砷污染的农田占金属污染农田的 25%,在我

收稿日期: 2009-02-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划 (2006BAD02A15); 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (092300410078)

作者简介: 邵云 (1973—), 女, 山东单县人, 副教授, 长期从事小麦生理生态研究。E-mail: shaoyun73@126.com

通讯作者: 李建民 E-mail: ljmsmylny@cau.edu.cn

国污染引起的土壤中,砷占第五位^[1-3]。土壤环境质量标准(GB15618—1995)中规定旱地砷的二级标准为 $\leq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。大量砷进入环境会对动物、植物乃至人类产生不良影响。因此,在污染土壤的修复研究中,土壤砷修复的研究受到了极大的关注。

小麦是我国重要的粮食作物。当土壤砷含量超过一定浓度时,对小麦生长有危害作用,使小麦生长发育受到显著抑制,甚至造成植株死亡。如果小麦中的砷含量超出可食用的标准,将直接或间接的危害人体健康,因此生产低砷含量的小麦对人们的健康至关重要^[4-5]。粉煤灰和碳酸钙(CaCO_3)作为土壤修复剂已为人们所接受,但目前多数研究仅注重了修复剂对镉、铅、铜等重金属污染的土壤理化特性及作物产量的影响^[6-9],而对于砷污染土壤上作物毒害效应缓解研究比较少见。本试验就粉煤灰和碳酸钙对砷污染土壤上小麦成熟期产量性状及砷含量的影响进行了研究,探讨了粉煤灰和碳酸钙缓解砷毒性的机理,为降低砷对小麦的胁迫作用以及进行土壤砷污染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

供试小麦(*Tritium aestivum* L.)品种为郑州 9023;试剂为 NaAsO_2 (A.R.)、 CaCO_3 (C.P.);供试土壤取自河南师范大学小麦试验田的表层土壤(0~20 cm)(土壤养分及主要重金属含量见表 1);粉煤灰取自河南师范大学锅炉房,过 5 mm 筛,测定其重金属含量为:As $1.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $0.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr $0.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $1.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn $4.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

盆栽试验用直径 28 cm、深 30 cm 的营养钵,每盆装土 10 kg(干重),处理浓度见表 2 所示。试验采用完全随机设计,3 次重复。在播种前将不同浓度梯度的 NaAsO_2 、粉煤灰、碳酸钙充分与土壤混匀后,平衡 7 d,于 2005 年 10 月 10 日播种,每盆播种 20 粒,播深 3 cm,三叶期定苗 10 株,正常措施管理,2006 年 5 月 28 日收获。收获时进行计产和考种,并采集小麦植株

表 2 试验处理中 As(Ⅲ)和修复剂浓度设置

Table 2 Concentration of As(Ⅲ) and improved material in experiment

处理 Treatment/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		NaAsO ₂ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 As 元素计		
		0	25	50
粉煤灰 Coal fly ash	0	0+0	0+25	0+50
	100	100+0	100+25	100+50
碳酸钙 Calcium carbonate	0	0+0	0+25	0+50
	1.0	1.0+0	1.0+25	1.0+50

及相应土壤,测定样品的 As 含量。

1.3 测定方法

1.3.1 计产与考种

盆栽试验在小麦成熟时对每盆中的所有小麦植株进行整盆计产及室内考种,调查其株高、穗长、结实小穗数、不孕小穗数、穗粒数、千粒重等。

1.3.2 As 含量的测定

收获时将小麦植株整盆取出,分离成根、茎叶和籽粒,去离子水洗净,60~80℃烘至恒重。根和茎叶样品用 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,过 0.40 mm 筛。土壤样品自然风干后,充分混合,粉碎,过 0.15 mm 筛。样品用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消解法消解,用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 TJA 公司生产,IRIS Advantage 型)测定其 As 含量。

试验结果用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 粉煤灰对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状及麦株 As 含量的影响

2.1.1 粉煤灰对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状的影响

由表 3 可以看出,单一 As(Ⅲ)处理时,随着 As(Ⅲ)浓度的增加,除穗长和不育小穗数外,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重、产量均呈下降趋势,说明 As 对小麦的产量有抑制作用;而对于单一粉煤灰处理,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量则均呈上升趋势,说明 $100 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 粉煤灰处理对小麦的产量具有一定

表 1 供试土壤养分及重金属含量

Table 1 Content of nutrition and heavy metal of soil in experiment

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter/ %	速效 N Available N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 P Available P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 K Available K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 Cd Total Cd / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 Pb Total Pd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 Zn Total Zn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 As Total As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
两合土	7.80	1.0	80	15	80	4.25	18	120	8.05

表 3 粉煤灰对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状的影响

Table 3 Effects of coal fly ash on yield constituents of wheat in As(Ⅲ) contaminated soil

粉煤灰 Coal fly ash/g·kg ⁻¹		NaAsO ₂ /mg·kg ⁻¹			<i>t</i> 值 <i>t</i> Value
		0	25	50	
株高 Height of wheat/cm	0	64.12	62.42	60.43	<i>t</i> _{CFA} =36.48**
	100	64.45	63.78	64.51	
穗长 Spike length/cm	0	15.30	15.37	15.40	<i>t</i> _{CFA} =18.66**
	100	14.33	13.70	14.00	
结实小穗数 Bearing spikelets	0	13.33	12.83	12.03	<i>t</i> _{CFA} =17.16**
	100	13.77	13.55	13.87	
不育小穗数 Barren spikelets	0	2.10	2.17	2.33	<i>t</i> _{CFA} =10.95*
	100	1.90	1.95	1.77	
穗粒数 Grains per spike	0	32.97	32.63	29.67	<i>t</i> _{CFA} =22.65**
	100	38.37	38.33	36.69	
千粒重 1 000 grains weight/g	0	24.44	24.43	23.29	<i>t</i> _{CFA} =50.78**
	100	25.57	26.78	25.79	
产量 Yield/g·pot ⁻¹	0	35.40	34.29	26.21	<i>t</i> _{CFA} =10.54*
	100	71.75	55.23	41.76	

的促进作用。经 *t* 检验可知,添加 100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰可显著减少小麦的不育小穗数($P<0.05$),显著增加小麦产量($P<0.05$),极显著促进小麦株高、结实小穗数、穗粒数和千粒重的增加($P<0.01$),极显著减小小麦穗长($P<0.01$)。当 As(Ⅲ)浓度为 25、50 mg·kg⁻¹ 时,100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理下,除穗长和不育小穗数外,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量均高于 0 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理(对照),说明无论是对于轻度 As(Ⅲ)污染(25 mg·kg⁻¹)还是中度 As(Ⅲ)污染(50 mg·kg⁻¹)的土壤,添加 100 g·kg⁻¹ 粉煤灰均能有效缓解小麦 As(Ⅲ)毒害,促进小麦的生长,提高其产量。

2.1.2 粉煤灰对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦成熟期植株及土壤 As 含量的影响

从表 4 可以看出,当 As(Ⅲ)浓度为 0、25 mg·kg⁻¹ 时,100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理下,土壤和根的 As 含量均高于 0 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理(对照),而茎叶和籽粒的 As 含量则低于对照;当 As(Ⅲ)浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时,100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰处理下,土壤、根、籽粒的 As 含量均比对照低,而茎叶中的 As 含量较高。由 *t* 检验(表 4)知,粉煤灰能极显著降低小麦籽粒中 As 含量($P<0.01$),而对土壤、根、茎叶中 As 含量的影响差异未达显著水平($P>0.05$)。由此可知,无论是在轻度 As(Ⅲ)污染(25 mg·kg⁻¹)还是中度 As(Ⅲ)污染(50 mg·kg⁻¹)的土壤上,添加 100 g·kg⁻¹ 的粉煤灰均能有效降低籽粒 As 含量。

表 4 粉煤灰对小麦植株及土壤 As 含量的影响

Table 4 Effects of coal fly ash on As content of wheat and soil(mg·kg⁻¹)

粉煤灰 Coal fly ash/g·kg ⁻¹		NaAsO ₂ /mg·kg ⁻¹			<i>t</i> 值 <i>t</i> Value
		0	25	50	
土壤 As 含量 As content of soil	0	8.05	16.00	34.00	<i>t</i> _{CFA} =0.11
	100	8.25	22.00	29.50	
根中 As 含量 As content of root	0	4.80	17.65	52.40	<i>t</i> _{CFA} =2.99
	100	5.15	18.85	43.90	
茎叶 As 含量 As content of stem and leaf	0	1.55	6.40	6.95	<i>t</i> _{CFA} =2.36
	100	0.80	4.70	10.10	
籽粒 As 含量 As content of grain	0	0.63	0.98	1.40	<i>t</i> _{CFA} =90.54**
	100	0.35	0.28	0.54	

2.2 碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状及麦株 As 含量的影响

2.2.1 碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状的影响

从表 5 可以看出,单一 As(Ⅲ)处理时,随着 As(Ⅲ)浓度的增加,除穗长和不育小穗数外,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重、产量均呈下降趋势;而单一碳酸钙处理下,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量则均呈上升趋势,说明 1.0 g·kg⁻¹ 的碳酸钙处理对小麦产量性状具有促进作用。经 *t* 检验知,1.0 g·kg⁻¹ 碳酸钙极显著降低了小麦的穗长($P<0.01$),极显著增加了小麦的穗粒数、千粒重和产量($P<0.01$),而株高、结

表 5 碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状的影响

Table 5 Effects of calcium carbonate on yield constituents of wheat in As(Ⅲ) contaminated soil

碳酸钙 Calcium carbonate/g·kg ⁻¹		NaAsO ₂ /mg·kg ⁻¹			<i>t</i> 值 <i>t</i> Value
		0	25	50	
株高 Height of wheat/cm	0	64.12	62.42	60.43	<i>t</i> _{CaCO₃} =0.22
	1.0	70.76	67.95	64.91	
穗长 Spike length/cm	0	15.30	15.37	15.40	<i>t</i> _{CaCO₃} =19.93**
	1.0	14.69	14.52	14.64	
结实小穗数 Bearing spikelets	0	13.33	12.83	12.03	<i>t</i> _{CaCO₃} =4.00
	1.0	14.40	14.73	14.50	
不育小穗数 Barren spikelets	0	2.10	2.17	2.33	<i>t</i> _{CaCO₃} =3.89
	1.0	1.70	1.90	1.40	
穗粒数 Grains per spike	0	32.97	32.63	29.67	<i>t</i> _{CaCO₃} =15.52**
	1.0	41.97	41.53	41.27	
千粒重 1000 grains weight/g	0	24.44	24.43	23.29	<i>t</i> _{CaCO₃} =62.09**
	1.0	25.16	25.85	25.12	
产量 Yield/g·pot ⁻¹	0	35.40	34.29	26.21	<i>t</i> _{CaCO₃} =25.52**
	1.0	75.88	56.52	38.35	

实小穗数和不育小穗数则未达显著水平($P>0.05$)。当 As(Ⅲ)浓度为 25、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙处理下,除穗长和不育小穗数外,株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量均高于 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙处理(对照),说明无论是对于轻度 As(Ⅲ)污染(25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)还是中度 As(Ⅲ)污染(50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤,添加 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙处理均能缓解小麦 As(Ⅲ)毒害,促进小麦的生长,提高其产量。

2.2.2 碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦成熟期植株及土壤 As 含量的影响

由表 6 可知,当 As(Ⅲ)浓度为 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙处理下,除土壤 As 含量高于 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙处理(对照)外,根、茎叶和籽粒 As 含量均低于对照;当 As(Ⅲ)浓度为 25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤和根部的 As 含量均高于对照,而茎叶和籽粒的 As 含量则低于对照;当 As(Ⅲ)浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙处理下,土壤、根、籽粒的 As 含量都低于对照,只有茎叶中 As 含量较高。经 t 检验,1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙对处理根中 As 含量的影响有显著性差异($P<0.05$),对籽粒 As 含量有极显著降低作用($P<0.01$),而土壤和茎叶 As 含量则表现为差异不显著($P>0.05$)。由此可知,无论是在轻度 As(Ⅲ)污染(25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)还是中度 As(Ⅲ)污染(50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)土壤上,添加 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙处理均能降低籽粒的 As 含量。

表 6 碳酸钙对小麦植株及土壤 As 含量的影响

Table 6 Effects of calcium carbonate on As content of wheat and soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

碳酸钙 Calcium carbonate/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		NaAsO ₂ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			t 值 t Value
		0	25	50	
土壤 As 含量 As content of soil	0	8.05	16.00	34.00	$t_{\text{CaCO}_3}=0.05$
	1.0	8.55	22.00	25.00	
根中 As 含量 As content of root	0	4.80	17.65	52.40	$t_{\text{CaCO}_3}=18.55^*$
	1.0	4.70	18.45	40.35	
茎叶 As 含量 As content of stem and leaf	0	1.55	6.40	6.95	$t_{\text{CaCO}_3}=0.10$
	1.0	1.05	6.10	12.05	
籽粒 As 含量 As content of grain	0	0.63	0.98	1.40	$t_{\text{CaCO}_3}=35.20^{**}$
	1.0	0.06	0.44	0.44	

3 讨论

由本试验结果可知,单一 As(Ⅲ)处理时,随着 As(Ⅲ)浓度的增加,除穗长和不育小穗数外,小麦株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重、产量均呈下降趋势;而单一粉煤灰或碳酸钙处理下,小麦株高、结实小穗

数、穗粒数、千粒重和产量则均呈上升趋势,说明粉煤灰或碳酸钙处理对小麦的产量性状具有一定的促进作用。同时,对成熟期小麦根、茎叶、籽粒和土壤 As 含量研究结果表明,无论是在轻度 As(Ⅲ)污染(25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)还是中度 As(Ⅲ)污染(50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤上,添加 100 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的粉煤灰或 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙处理均能降低籽粒的 As 含量。说明在麦田土壤中添加适量的粉煤灰或碳酸钙能有效缓解 As 对小麦的毒害,提高 As 污染土壤上小麦的产量,同时有效降低小麦成熟期籽粒 As 含量。在农业生产中相当于施粉煤灰 147 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或施碳酸钙 1 455 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

分析粉煤灰和碳酸钙缓解小麦 As 毒害的机制,可能与粉煤灰中富含 Ca、Mg、P、K、Si 等营养元素和碳酸钙中富含 Ca 元素有关。Ca、Mg、P、K 都是植物生长发育的必需元素,适当添加粉煤灰或碳酸钙有利于小麦的生长。另外, Ca^{2+} 对 AsO_2 具有沉淀作用,从而减缓了 As 对小麦的毒害。 Ca^{2+} 对细胞膜透性及细胞分裂具有一定作用,它参与细胞壁中层结构的组建,可与果胶质形成不溶性沉淀,改变其结构及透性,从而阻止有毒元素 As 的侵入;同时 Ca^{2+} 能调节细胞膜的不通透性,有 Ca^{2+} 存在时,细胞膜不会发生“渗漏”^[10],这样就减缓了 As 胁迫对细胞膜的损伤。 Ca^{2+} 对某些酶具有激活与稳定作用,如 α -淀粉酶等水解酶类。 Ca^{2+} 还能促进顶端分生组织的分裂。 Mg^{2+} 提高了环境中 Mg^{2+} 浓度从而促进了生物体内叶绿素的合成,光合作用增强,从而缓解小麦的 As 毒害。P 与 As 是同族元素,化学性质十分相似,二者间具有一定的拮抗作用。在作物体内,P 是核酸、核蛋白、植酸、磷脂、ATP 等的组成元素,促进细胞分裂与增殖以及根、芽生长点细胞的伸长。P 还是参与呼吸作用的众多必需酶类的辅酶,例如脱氢酶类需要辅酶 I、II,氧化酶类需要黄素核苷酸(FAD)等,P 的吸收利用提高了部分酶的活性^[11]。在生物氧化过程中,当生物体系中有无机 As 存在时,砷酸(Asi)和磷酸(Pi)相似,砷酸能引起氧化磷酸化解偶联,在氧化或光合循环中合成了 ADP-As ,而不是 ATP,由于 ADP-As 易于水解,因而使氧化或光合作用产生的能量白白流失。当土壤中有 P 与 As 同时存在时,它们在土壤中可竞争同一吸附点^[12],植物根系优先吸收 P,对 As 的吸收产生竞争作用从而降低了 As 对植物的毒害作用。

粉煤灰和碳酸钙都是常见易得的改良材料,并且操作起来简单易行,在农业生产中易于推广。但是,高浓度的粉煤灰会产生盐毒害。过量使用粉煤灰对植物

产生伤害已有不少报道,Reilly(1995)^[13]、Sim(1995)^[14]等研究表明,粉煤灰由于盐度过高会影响作物生长。另外,粉煤灰的施入改善了土壤的物理结构从而加快了土壤好气微生物的活动,土壤有机质分解加快,容易引起作物早衰现象。而高浓度的碳酸钙可能造成土壤pH值过高、土壤板结等,影响植物生长发育^[15],因此,在生产中应重视增施有机肥加以调节^[16]。

4 结论

(1)在As(Ⅲ)污染土壤上,随着As(Ⅲ)浓度的增加,除穗长和不育小穗数外,小麦株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重、产量均呈下降趋势;而添加适量的粉煤灰或碳酸钙后,小麦株高、结实小穗数、穗粒数、千粒重和产量则均呈上升趋势,说明在土壤中添加适量粉煤灰或碳酸钙对小麦的产量性状具有一定的促进作用。

(2)对成熟期小麦根、茎叶、籽粒和土壤As含量研究表明,无论是在轻度As(Ⅲ)污染($25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)还是中度As(Ⅲ)污染($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤上, $100\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的粉煤灰或 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙处理均能降低籽粒的As含量。

参考文献:

- [1] 朱云集,王晨阳,马元喜,等. 砷胁迫对小麦根系生长及活性氧代谢的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 797-800.
ZHU Yun-ji, WANG Chen-yang, Ma Yuan-xi, et al. Effect of arsenic stress on the growth and metabolism of the wheat root system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 797-800.
- [2] Smith E, Naidu R, Alston A M. Arsenic in the soil environment[J]. *A review. Advance in Agronomy*, 1998, 64: 149-195.
- [3] 赵其国. 发展与创新现代土壤科学[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 321-327.
ZHAO Qi-guo. Development and innovation of modern soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 321-327.
- [4] Konn X S. Effect of Cd toxicity on cell membrane permeability and protective enzyme activity of maize seedling[J]. *Agro Protection*, 1999, 18(3): 133-134.
- [5] Zhan Y X. Toxicity of heavy metals to hordeum vulgare[J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 1997, 17(2): 199-201.
- [6] 屠乃美,郑华,邹永霞,等. 不同改良剂对铅镉污染稻田的改良效应研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(6): 324-326.
TU Nai-mei, ZHENG Hua, ZOU Yong-xia, et al. Effects of different modifiers on rice growth and Pb & Cd contents of rice and soil in Pb-Cd-contaminated paddy field[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(6): 324-326.
- [7] 陈晓婷,王果,梁志超,等. 钙镁磷肥和硅肥对Cd、Pb、Zn污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(1): 109-112.
CHEN Xiao-ting, WANG Guo, LIANG Zhi-chao, et al. Effects of calcium magnesium phosphate and silicon fertilizer on the growth and element uptake of pakchoi in cadmium, lead and zinc contaminated soil[J]. *Journal of Fujian Agricultural University(Natural Science)*, 2002, 31(1): 109-112.
- [8] 郝秀珍,周东美,钱海燕. 改良剂对铜矿尾矿砂与菜园土混合土壤性质及黑麦草生长的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(2): 38-42.
HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, QIAN Hai-yan. Effects of soil amendments on the characters of mixed soil (copper mine tailing and garden soil) and on the growth of ryegrass on it[J]. *Rural Eco-environment*, 2003, 19(2): 38-42.
- [9] 郝秀珍,周东美,王玉军,等. 不同改良剂对铜矿尾矿砂的改良效果研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 11-15.
HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, WANG Yu-jun, et al. Effect of amendments on ryegrass grown on copper mine tailing[J]. *Rural Eco-environment*, 2002, 18(1): 11-15.
- [10] 韩照祥,冯贵颖,吕文洲,等. 环境中As(Ⅲ)对小麦萌发的影响及砷毒害防治初探[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 123-128.
HAN Zhao-xiang, FENG Gui-ying, LV Wen-zhou, et al. Study on effects of As(Ⅲ) in environment on wheat sprout and the original researcher of prevention and treatment of arsenic toxicant[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2002, 22(1): 123-128.
- [11] Galston A, Davies P, Satter R. 戴尧仁,倪逸声,葛明德译. 新编植物生理学——绿色植物的生活[M]. 北京:北京大学出版社, 1989: 194-197.
Galston A, Davies P, Satter R. Living of green plant[M]. Beijing: Publishing Company of Peking University, 1989: 194-197.
- [12] 张广莉,宋光煜,赵红霞. 磷影响下砷的根际效应及其对水稻生长的影响[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(5): 66-68.
ZHANG Guang-li, SONG Guang-yu, ZHAO Hong-xia. Effects of arsenic under effects of phosphorus in rhizosphere and on growth of rice[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(5): 66-68.
- [13] Reilly S E, Sims J T. Phosphorus adsorption and sorption in a sandy soil amended with high rates of coal fly ash[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26: 2983-2993.
- [14] Sims J T, Ghodrli M. Evaluation fly ash as a soil amendment for the Atlantic coastal plain: II Soil chemical properties and crop growth[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 81(3-4): 363-372.
- [15] Albasel N, Cottenie A. Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime, and chelates[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 386-390.
- [16] 丁军,马新明,李新平,等. 粉煤灰改良砂姜黑土对冬小麦田生态因子的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 221-224.
DING Jun, MA Xin-ming, LI Xin-ping, et al. Effect of shajiang black soil amended by coal flying ash on ecological factors in winter wheat[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 221-224.