

## 施用钾肥(KCl)的土壤对作物吸收累积镉的影响\*

衣纯真 付桂平 张福锁 李花粉

(中国农业大学资环学院,北京 100094)

**摘要:** 本文研究在镉污染的土壤上施用钾肥(KCl)对水稻、小麦在不同生育期吸收累积镉的影响。结果表明:KCl对这两种作物吸收镉均有促进作用,KCl对水稻吸收镉的促进效率高于小麦,其可食部分含镉量是:麦粒>糙米。

**关键词:** 钾肥(KCl); 镉的吸收和累积; 作物; 生育期

**中图分类号:** S511.1; S143.72

土壤中Cd的人为污染随着现代化工业的发展,大气污染和水体污染而加剧,土壤污染已引起人类极大的关注。当前由于靠近有Cd散发源的工业区,大气污染或用废水灌溉,农田土壤的可溶性Cd含量高达几十 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沈阳张士灌区长期用含重金属废水灌溉,水田土壤的可溶性Cd含量有的高达 $6\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上<sup>[1]</sup>。继日本60年代在富山县神通川流域发生“骨痛病”以来,在我国不少地方也相继出现农田土壤Cd污染的问题,其Cd污染对人体健康已构成极大的威胁<sup>[2]</sup>。

植物对Cd的吸收和累积与其生长的土壤中Cd的浓度,土壤的物理、化学性质及Cd在土壤中的活性,植物的种、属、类型和其它环境因素等有关系<sup>[3]</sup>。Cd是有害的金属元素,但许多植物均能从Cd污染的水和土壤中摄取Cd,并在体内累积<sup>[4,5]</sup>。

施用钾肥是重要的农业增产措施,我国农用钾肥绝大部分依靠进口。常用品种有KCl,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ , 而KCl使用更普遍,价格也便宜,那么KCl肥的施用对Cd污染土壤上植物吸收Cd有什么影响是人们需要认识的问题<sup>[6,7]</sup>该项研究对Cd污染土壤上正确用钾肥有重要指导意义。

### 1 试验设计与方法

1.1 试验设计 供试作物:水稻(远诱一号),小麦(051)。

供试土壤:取自沈阳市张士灌区Cd污染的水稻田土。该土壤为草甸棕壤,质地为粘土。土壤取自耕作层,风干后过筛(1cm),充分混匀。该土壤的主要农化性状见表1。

表1 张士灌区镉污染的土壤基本性状

Table 1 The basic soil properties of Cd-contaminated collected in Sheng Yang

全氮 /g·kg <sup>-1</sup> Total N	碱解氮 /mg·kg <sup>-1</sup> Alka. hydro. N	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup> Readily avai. k	速效磷 /mg·kg <sup>-1</sup> Olsen P	有机质 /g·kg <sup>-1</sup> O. M.	氯离子 /mg·kg <sup>-1</sup> Cl <sup>-</sup>	全镉 /mg·kg <sup>-1</sup> Total Cd	CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>	pH	1MNH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	0.1MHCl -Cd /mg·kg <sup>-1</sup>
2.13	110	128	24.0	27.3	114	4.08	325	6.0	0.24	3.48

收稿日期:1995-07-21

\* 国家自然科学基金资助项目。

试验设计:水稻、小麦试验分营养期、开花期、成熟期3次采样,试验用瓷盆 $20 \times 20$  cm,每盆装土4 kg,试验设置为施钾肥(KCl)4个不同水平与不施钾肥(CK)共5种处理,各处理均为3个重复。各施氮素 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,磷酸二铵折合 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$ 。小麦、水稻在苗期移栽入盆并定株,并于营养期、开花期、成熟期3次采样。

1.2 分析方法 土壤全镉的测定:王水——高氯酸消化法。植株体内镉的测定:硝酸——高氯酸消化法。以上各方法所得待测液均用日立-8000型原子吸收分光光度计测定(附设石墨炉测定装置)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同 KCl 水平对水稻吸收镉的影响

不同 KCl 水平对水稻各生育期内镉含量的影响列于表 2。从图 1,2,3 看出,在水稻各生育期体内镉的含量都随 KCl 施用量的增加而增加,说明 KCl 促进了水稻对镉的吸收。在成熟期,KCl 处理的最高水平( $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}_2\text{O}$ )与对照(CK)相比,使叶中 Cd 提高了 214%,茎中 Cd 提高 90%,谷壳中 Cd 提高 276%,糙米中 Cd 提高 200%,这是由于  $\text{K}^+$  对植物吸 Cd 的促进作用。 $\text{K}^+$  对植物吸收 Cd 产生影响主要包括两方面,一是由于  $\text{K}^+$  在土壤颗粒表面与 Cd 发生交换作用,提高了 Cd 的有效性;二是当植物生长在缺  $\text{K}^+$  土壤上,由于施钾促进了植物根系的伸展,根系的吸收机能增强,从而吸 Cd 量也会增加。本试验因土壤有效钾含量高,生物量在施钾处理中并无显著增加趋势,所以  $\text{K}^+$  对 Cd 吸收的促进作用主要应归为  $\text{K}^+$  对土壤的交换作用,但这种作用要决定于土壤 CEC 值的大小,如果土壤中交换态 Cd 含量很高,则  $\text{K}^+$  的交换作用不容忽视。本试验即属此种情况<sup>[8]</sup>。

2.2 不同 KCl 水平对小麦各生育期体内镉含量的影响 不同 KCl 水平对小麦各生育期体内镉含量的影响列表 3 中。从其结果看出,小麦体内各部分 Cd 的含量变化与水稻相同,即随

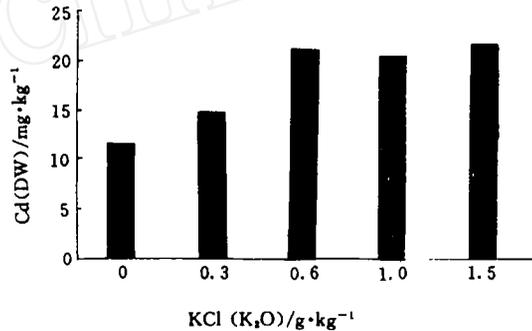


图 1 KCl 水稻营养期体内 Cd 累积的影响

Fig. 1 The uptake of Cd by vegetative stage in rice

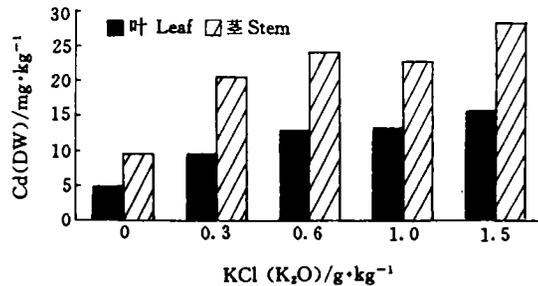


图 2 水稻开花期体内 Cd 含量

Fig. 2 Tissue Cd content of rice in flowering stage

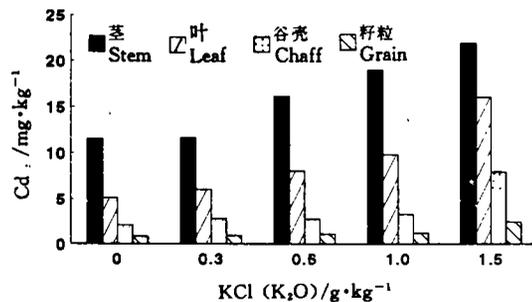


图 3 水稻成熟期体内 Cd 含量

Fig. 3 Tissue Cd content of rice in ripening stage

着 KCl 施用量的增加而增加。这说明 KCl 对小麦吸 Cd 也有促进作用。

表 2 钾肥对水稻各生育期体内镉含量的影响 \*

Table 2 The effects of potash fertilizers on uptake Cd at different growth stage in rice

KCl 处理 Treatment (K <sub>2</sub> O) /g·kg <sup>-1</sup>	营养期(干物重) Vegetative stage (D. W)		开花期(干物重) Flowering stage (D. W)			成熟期(干物重) Ripening stage (D. W)				
	干物重	地上部	干物重	叶 Cd	茎 Cd	干物重	叶 Cd	茎 Cd	谷壳 Cd	糙米 Cd
	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/g·pot <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/g·pot <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>
	Dry-weight	The Part on ground	Dry-weight	Leaf Cd	Stem Cd	Dry-weight	Leaf Cd	Stem Cd	Chaff Cd	Grain Cd
CK	7.73	11.7c	11.5	4.8e	9.4e	23.1	5.1c	11.5d	2.1c	0.8c
0.3	8.7	14.8b	16.3	9.4c	20.3c	29.7	6.0c	11.6d	2.8c	0.9c
0.6	7.3	21.2a	10.1	12.7b	24.0b	26.3	8.0b	16.1c	2.7c	1.1c
1.0	8.2	20.7a	12.6	13.2b	22.6bc	27.4	9.8b	18.9b	3.3c	1.2b
1.5	8.0	21.7a	16.3	15.5a	28.1a	30.9	16.0a	21.9a	7.9a	2.4a

\* 表中数据均为 3 个重复的平均值(均以干物重计)。表中小写英文字母表示邓肯法统计检验结果,显著性标准为 5%,以下相同。

表 3 钾肥对小麦各生育期体内镉含量的影响

Table 3 The effects of potash fertilizers on uptake Cd at different growth stage in wheat

KCl 处理 Treatment (K <sub>2</sub> O) /g·kg <sup>-1</sup>	营养期(干物重) Vegetative stage(D. W)			开花期(干物重) Flowering stage(D. W)				成熟期(干物重) Ripening stage(D. W)				
	干物重	叶 Cd	茎 Cd	干物重	叶 Cd	茎 Cd	穗 Cd	干物重	叶 Cd	茎 Cd	穗壳 Cd	麦粒 Cd
	/g·pot <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/g·pot <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/g·pot <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>	/mg·kg <sup>-1</sup>
	Dry-weight	Leaf Cd	Stem Cd	Dry-weight	Leaf Cd	Stem Cd	Eer Cd	Dry-weight	Leaf Cd	Stem Cd	Shell Cd	Grain Cd
CK	0.9	1.0c	3.4c	4.0	2.9c	5.8d	0.8d	9.2	11.8c	5.2c	2.8d	3.2
0.15	1.2	2.2ab	6.5b	4.1	3.6c	7.0c	1.1c	12.9	11.6c	5.8c	3.8c	3.7c
0.30	1.3	2.6ab	6.3b	4.5	4.2b	8.1b	1.1b	10.6	13.3b	6.5b	5.2b	4.3b
0.60	1.2	3.3a	8.0a	5.0	4.8b	9.3a	1.3a	12.5	14.3ab	8.5a	5.4ab	4.3b
1.00	1.1	2.5b	7.6ab	3.8	6.1a	9.2a	1.4a	9.6	15.3a	9.0a	6.3a	5.3a

2.3 KCl 对两种作物吸收镉的促进效率的比较 以下对 KCl 施水平(X)与作物体内 Cd 含量(y)进行线性相关分析,其结果列表 4,KCl 对镉吸收促进效率可用“单位 KCl 的施用量增加作物体内 Cd 的数量(即回归方程的系数 b)占不施钾肥时(X=0)作物体内镉的数量(即回归方程的系数 a)的百分数”来表示。

从表 4 可看出,KCl 施用量与作物体内 Cd 含量间的相关系数均达到显著(或极显著)标准(小麦营养期叶中 Cd 例外)。说明土壤施用 KCl 会引起作物体内(包括籽实)Cd 含量的升高,从而对人畜产生危害。同时可看出, KCl 对水稻体内 Cd 的促进效率普遍高于小麦(水稻成熟期茎中镉例外,可能因为成熟期茎中养分的转移效率较高,此规律性不明显),这是因为水稻种植条件下 KCl<sup>-</sup>对 Cd 吸收的促进作用较强。在小麦叶片中,从营养期到开花期,KCl 对叶片吸收 Cd 的促进效率增大,而到成熟期时,促进效率迅速下降,这说明通过 K<sup>+</sup>交换土壤颗粒表面 Cd<sup>2+</sup>的作用而增加其吸 Cd 量,在开花期最明显,到成熟期时又变弱。小麦茎中没有此规律性,这可能是因为在茎中营养物质在开花期以后大部分转移到籽粒中,而且转移效率因个体差异较大。

2.4 不同作物体内镉的分布与转移 水稻:水稻开花期和成熟期地上各部分 Cd 的分布见

表4 不同KCl施用量与作物体内镉含量的相关分析

Table 4 Correlation analysis of applying KCl and Cd content in crops

作物 Crops	生育期 Growth stage	部位 Part	回归方程 Regression equation ( $y=a+bx$ )	相关系数 Correlation coefficient	促进效率/% Promote efficiency b/a
小麦 Wheat	营养期 vegetative stage	叶 Leaf	$y=1.76+1.29x$	0.61	73.1
		茎 Stem	$y=4.91+3.54x$	0.771 *	72.1
	开花期 Flowering stage	叶 Leaf	$y=3.09+3.02X$	0.989 **	97.7
		茎 stem	$y=6.50+3.36X$	0.892 **	51.8
		穗 Ear	$y=0.89+0.55X$	0.931 **	61.7
	成熟期 Ripening stage	叶 Leaf	$y=11.71+3.83X$	0.961 **	32.7
		茎 Stem	$y=5.34+4.06X$	0.966 **	76.0
籽粒 Grain	$y=3.35+1.93X$	0.961 **	57.5		
小稻 Rice	营养期 vegetative stage	叶 Leaf	$y=13.55+6.58X$	0.861 *	48.6
		开花期 Flowering stage	叶 Leaf	$y=6.69+6.54X$	0.929 **
	成熟期 Ripening stage	茎 Stem	$y=13.91+10.26X$	0.863 **	73.8
		叶 Leaf	$y=4.15+7.11X$	0.968 **	171.5
	壳 chaff	$y=1.78+3.13X$	0.822 **	176.1	
	糙米 Gain	$y=0.62+0.99X$	0.897 **	158.4	

\*, \*\* 分别表示相关关系达到显著或极显著标准

表5, 从表5中看出, 随KCl施用量的增加, 水稻地上部Cd的累积总量也在增加, 说明KCl促进了水稻对Cd的吸收。水稻开花期叶中Cd占地上部总Cd量的71.0%(平均值); 茎中Cd占31.8%, 可见水稻开花期地上部的Cd主要集中在叶片中。

表5 水稻生育期体内镉累积量的分布

Table 5 The distribution of uptake Cd at different growth stage in rice

项目 Item	Item	KCl处理(K <sub>2</sub> O)/g·kg <sup>-1</sup> Treatment					$\bar{X} \pm SD$	
		0	0.3	0.6	1.0	1.5		
开花期 Flowering stage	地上部镉总量/ $\mu\text{g}$	Total Cd	61.4	163.0	144.3	214.0	242.3	
	叶镉/ $\mu\text{g}$	Leaf Cd	43.0	102.1	107.1	155.0	183.7	71.0 $\pm$ 3.8
	百分数/%	Percentage	70.0	62.6	74.2	72.4	75.8	
	茎镉/ $\mu\text{g}$	Stem Cd	18.4	60.8	37.2	59.1	93.2	31.8 $\pm$ 4.8
成熟期 Ripening stage	百分数/%	Percentage	30.0	37.3	25.8	27.6	38.5	
	地上部镉总量/ $\mu\text{g}$	Total Cd	79.7	155.0	184.0	200.0	287.0	
	叶镉/ $\mu\text{g}$	Leaf Cd	31.6	74.9	101.9	113.7	151.0	
	百分数/%	Percentage	39.6	48.3	55.4	56.8	52.6	50.5 $\pm$ 5.3
	茎镉/ $\mu\text{g}$	Stem Cd	37.4	65.7	65.7	76.8	103.8	
	百分数/%	Percentage	46.9	42.6	35.6	38.4	36.2	39.9 $\pm$ 3.8
	谷壳镉/ $\mu\text{g}$	Chaff Cd	4.2	5.5	5.4	3.4	14.7	
百分数/%	Percentage	5.3	3.6	2.9	1.7	5.1	3.7 $\pm$ 1.1	
	糙米镉/ $\mu\text{g}$	Grain Cd	6.0	8.9	11.0	5.8	17.3	
	百分数/%	Percentage	7.5	5.7	6.0	2.9	6.0	5.6 $\pm$ 1.1

水稻进入成熟期(枯死老叶中的Cd未能计入)后, 由于体内养分的再分配, Cd的分布也发生变化。水稻成熟期地上部Cd的累积量也是随KCl施用量的增高而增加, 在成熟期叶

片中 Cd 的数量占地上部总 Cd 量的 50.5%(平均值),茎中 Cd 占 39.9%,谷壳中 Cd 占 3.7%,糙米中 Cd 平均占 5.6%。与开花期比较,叶片中累积的 Cd 的比例下降,茎中 Cd 比例上升,这主要因为在进入生殖生长期以后 Cd 随干物质在体内重新分配的结果。茎中 Cd 一方面有部分转移到生殖器官,另一方面又有根系新吸收的 Cd 来补充,因而其百分数反而上升。Cd 在水稻体内的分配(总量)顺序是:叶>茎>糙米>谷壳,这与水稻体内 Cd 量(浓度)的顺序为:茎>叶>谷壳>糙米是不同的。

小麦:小麦不同生育期地上各部分 Cd 的分布见表 6。由表 6 看出,小麦营养期叶中 Cd 占地上部 Cd 总量的百分数平均为 37.2%,茎中 Cd 平均占 63.0%,可见小麦营养期 Cd 累积(绝对量)顺序是:茎>叶。小麦开花期地上部 Cd 的总量比营养期吸 Cd 量多。叶片中累积的 Cd 占地上部总 Cd 量,平均为 36.8%,茎中 Cd 平均占 57.7%,穗中 Cd 平均占 5.2%。因此小麦开花期 Cd 的累积顺序(绝对量)为:茎>叶>穗,这与水稻开花期时 Cd 的累积顺序是:叶>茎不同的。小麦成熟期地上部 Cd 总量与其开花期相比,Cd 累积总量增加较多,说明开花期以后小麦从土壤中吸 Cd 量仍然很多,小麦叶中 Cd 累积量占地上部 Cd 总量平均为 40.6%,茎中 Cd 平均占 19.5%,穗中 Cd 平均占 13.0%,麦粒中 Cd 平均占 27.2%。Cd 在小麦成熟期体内的分配顺序(绝对量)为:叶>籽粒>茎>穗壳,与体内 Cd 浓度顺序为

表 6 小麦各生育期体内镉累积量的分析

Table 6 The distribution of uptake Cd at different growth stage in wheat

项 目	KCl 处理(K <sub>2</sub> O)/g·kg <sup>-1</sup>	Treatment					X+SD
		0	0.15	0.3	0.6	1.0	
Vegetative stage 营养期	地上总镉 Total Cd /ug	1.5	4.6	5.0	5.8	5.0	
	叶/ug Leaf Cd	0.6	1.7	1.5	2.7	1.6	
	百分数/% Percentage	40.0	36.9	30.0	46.5	32.0	37.2±4.9
	茎/ug Stem Cd	0.9	2.9	3.5	3.1	3.4	
	百分数/% Percentage	60.8	63.0	70.0	53.4	68.0	63.0±4.9
Flowering stage 开花期	地上总镉/ug Total Cd	14.2	17.2	21.4	29.7	20.9	
	叶/ug Leaf Cd	4.7	6.6	8.2	11.2	7.6	
	百分数/ug Percentage	33.1	38.4	38.3	37.7	36.4	36.8±1.6
	茎/ug Stem Cd	8.8	9.7	11.9	16.9	12.0	
	百分数/% Percentage	62.0	56.4	55.6	56.9	57.4	57.7±1.8
	穗/ug Eer Cd	0.7	0.7	1.2	1.6	1.3	
	百分数/% Percentage	4.9	4.1	5.6	5.4	6.2	5.2±0.6
Ripe stage 成熟期	地上总镉/ug Total Cd	46.7	77.3	71.5	85.6	72.6	
	叶/ug Leaf Cd	20.5	30.5	30.0	33.2	28.4	
	百分数/% Percentage	43.9	39.5	41.9	38.8	39.1	40.6±1.8
	茎/ug Stem Cd	9.5	12.9	12.0	18.8	15.6	
	百分数/% Percentage	20.3	16.7	16.8	22.0	21.5	19.5±2.2
	穗壳 Eer Cd (ug)	5.6	13.4	10.6	10.4	6.3	
	百分数/% Percentage	12.0	17.3	14.8	1.2.1	8.7	13.0±2.5
	麦粒/ug Gain Cd	11.8	20.5	18.9	23.2	22.4	
	百分数/% Percentage	25.3	26.5	26.4	27.1	30.6	27.2±1.4

叶>茎>穗壳≈籽粒是不同的。可见,小麦成熟期,Cd 较易在麦粒中累积,茎中 Cd 的累积比例大大下降,叶中 Cd 的比例基本不变,麦粒中 Cd 比例较大。这说明小麦在开花期以

后,大量的 Cd 从茎中转移到籽实中累积起来,而叶中 Cd 的转移效率不如茎。从表 6 还可看出,钾肥处理的小麦,其累积 Cd 的总量在小麦整个生育期都比对照(CK)高,说明施用钾肥(KCl)促进了小麦对 Cd 的吸收,与成熟期小稻相比,Cd 在小麦籽粒中的累积比例远远高于水稻籽粒中 Cd 的累积比例,因此,在 Cd 污染的土壤上更不宜种植小麦<sup>[9]</sup>。

### 3 结论

①在 Cd 污染的土壤上施用 KCl 肥料对水稻和小麦吸收 Cd 均有促进作用。但 KCl 对植物吸收 Cd 的促进作用在不同作物、不同生育期中表现的度不一样。②在 Cd 污染的土壤上施用 KCl 肥料后,不同作物成熟期体内 Cd 含量的比较:水稻茎中 Cd > 叶中 Cd > 谷壳中 Cd > 糙米中 Cd; 小麦叶中 Cd > 茎中 Cd > 穗壳中 Cd > 麦粒中 Cd。可食部分比较:麦粒 > 糙米。③KCl 对小稻吸收 Cd 的促进效率高于小麦。在体内 Cd 的再分配过程中,小麦籽实中 Cd 来源于茎中 Cd 的比例高于叶中 Cd; 而水稻籽实中 Cd 来源于叶中 Cd 的比例相对要高些。

### 参 考 文 献

- 1 陈涛,吴燕玉. 张士灌区镉改良和水稻镉污染防治研究. 环境科学,1980,1(5):7~11
- 2 袁一傲. 沈阳张士灌区镉的环境污染与人群健康影响的研究. 中国公共卫生学报,1992,11(4):225~228
- 3 Cabrera D, Yong S D, Rowell D L. The toxicity of Cadmium to barley plants as affected by complex formation with humic acid. Plant Soil, 1988,105:195~204
- 4 鲁如坤,熊礼明. 关于土壤——作物生态系统中镉的研究. 土壤,1992,24(3):129~132
- 5 秦世学. 土壤镉污染对作物的影响及作物对镉的吸收. 环境科学丛刊,1984,4(10):8~19
- 6 吴燕玉. 张士灌区镉污染综合防止技术的研究. 中国环境科学,1985,5(3):2~6
- 7 Bingham F T, Sposito G, Strong J E. The effect of chloride on the availability of Cadmium. J Environ Qual, 1984,13:71~74
- 8 王宏康. 土壤中金属污染的研究进展. 环境化学,1991,10(5):35~41
- 9 郑绍建,胡霭堂. 淹水对污染土壤 Cd 形态转化的影响. 环境科学学报,1995,15(2):142~147

## Effects of Potash Fertilizer on Uptake and Accumulation of Cadmium by Crops

Yi Chunzhen Fu Guiping Zhang Fusuo Li Huafen

(College of Agriculture Resources and Environment Science CAU, Beijing 100094)

**Abstract:** Pot experiment was conducted to study the effect of potash fertilizer on Cd uptake and accumulation by rice and wheat. The results indicated that KCl stimulated the Cd uptake of rice and wheat grown in the Cd-contaminated soil. The stimulation of Cd uptake by KCl application varied with crops and growth stage. More stimulation was found in rice than that in wheat Cd content in wheat grains was greater than rice.

**Key Words:** potash fertilizers(KCl); cadmium uptake; crops; growth stage